



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

**Institut für Reaktorwerkstoffe
Zentralinstitut für Angewandte Mathematik**

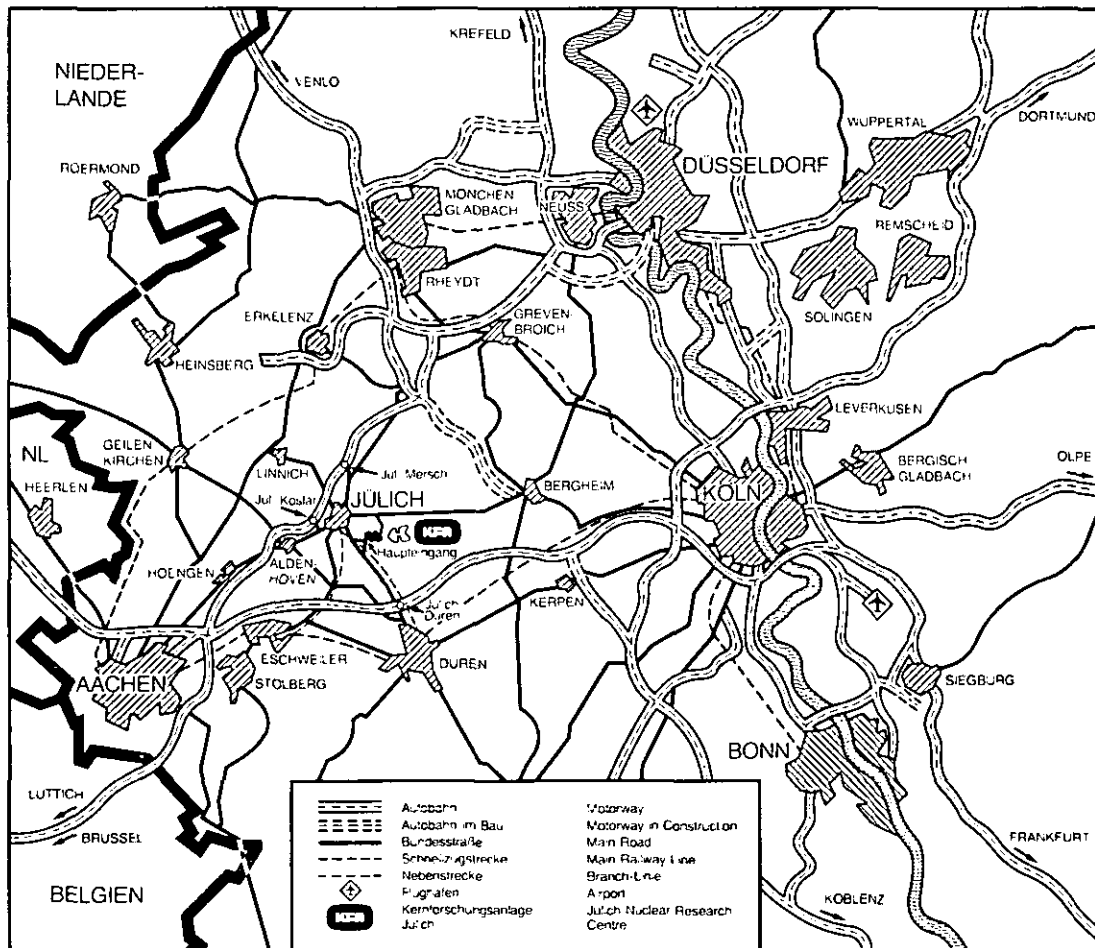
**Computer-Tomographie an Fässern
mit radioaktivem Inhalt**

von

Reiner Duwe

Paul Jansen

**Jül-Spez-498
April 1989
ISSN 0343-7639**



Als Manuskript gedruckt

Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 498

Institut für Reaktorwerkstoffe und

Zentralinstitut für Angewandte Mathematik Jül-Spez-498

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH

Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

Computer-Tomographie an Fässern mit radioaktivem Inhalt

18. April 1989

Reiner Duwe
Institut für Reaktorwerkstoffe / Heiße Zellen

Paul Jansen
Zentralinstitut für Angewandte Mathematik

KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GMBH

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
Prinzip der tomographischen Messung und Aufbau des Meßplatzes	2
Prinzip der tomographischen Auswertung	8
Mathematisches Modell und Herleitung der Gleichungssysteme	12
Lösung des Gleichungssystems mit Hilfe der Algebraischen Rekonstruktionstechnik (ART)	16
Anwendung des Verfahrens	21
Überprüfung der TCT	25
Überprüfung der ECT	34
Apparative Weiterentwicklung der Tomographie	41
Literatur	42

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1. Prinzip der ECT	2
Abb. 2. Co60 mit Ge-Detektor (oben) und mit NaJ-Detektor (unten)	3
Abb. 3. Prinzip der TCT	5
Abb. 4. Sb124-Quelle ohne (oben) und mit betonierte Faß im Strahlengang (unten)	6
Abb. 5. Meßanlage in den Heißen Zellen des IRW	7
Abb. 6. Diskretisierung der Faßebene durch Rasterung ($n=10$)	9
Abb. 7. Verfahren von Kaczmarz (2 Gleichungen mit 2 Unbekannten)	10
Abb. 8. Verfahren von Kaczmarz (3 Gleichungen mit 2 Unbekannten)	10
Abb. 9. Zusammenhang zwischen Absorptionskoeffizient und Dichte bei einer γ -Energie von 1,25 MeV	12
Abb. 10. Schema der CT bei geänderter Winkelposition des Meßstrahls	14
Abb. 11. Anpassung einer Näherungsverteilung an eine Meßkurve, anschließend Drehung	17
Abb. 12. Gesamtablauf der Computer-Tomographie	19
Abb. 13. Vergleich einer Meßkurve und einer berechneten Projektion	20
Abb. 14. Mathematisches Phantom zur TCT	22
Abb. 15. Simulierte Projektionskurve	22
Abb. 16. Rekonstruierte Verteilung nach 1,2,5,10 Iterationen	23
Abb. 17. Simulierte Projektionskurve mit Meßfehler	24
Abb. 18. Rekonstruktion nach 5 Iterationen	24
Abb. 19. 16 transformierte TCT-Projektionen von Normbauteilen	25
Abb. 20. Dichteverteilung von Normbauteilen	26
Abb. 21. TCT-Meßkurve und transformierte Kurve.	27
Abb. 22. Dichterekonstruktion eines Abfallfasses	28
Abb. 23. Dichterekonstruktion eines Abfallfasses nach Bohrkernentnahme	29
Abb. 24. Parameterstudie zur Anzahl nötiger Projektionen (2,4,8,16)	30
Abb. 25. Höhenlinien- und aufgeschnittene 3D-Darstellung des Abfallfasses	31
Abb. 26. Dichterekonstruktion eines 400 ℓ -Fasses	32
Abb. 27. Dichterekonstruktion eines 200 ℓ -Fasses (stark inhomogen)	33
Abb. 28. Muster aus Graphit- und Brennelementkugeln und rekonstruierte Aktivitätsverteilung	35
Abb. 29. Muster aus Graphit- und Brennelementkugeln und rekonstruierte Verteilung	36
Abb. 30. Fotografie eines MAW-Fasses bei Beladung	37
Abb. 31. γ -Aktivität des MAW-Fasses	38
Abb. 32. Projektion der γ -Aktivität (Scan) des Abfallfasses	39
Abb. 33. γ -Aktivität des Abfallfasses	40
Abb. 34. Anlage zur kombinierten TCT und ECT.	41

Abstract

Bevor Abfallfässer mit radioaktivem Inhalt in einem Endlager eingelagert werden, muß insbesondere das Radionuklidinventar für den Betreiber des Endlagers angegeben werden. Wenn es sich um zementierte Abfälle mit relativ hoher Dichte handelt, wird ein beträchtlicher Teil der γ -Strahlung im Faß selbst absorbiert, so daß eine zerstörungsfreie Überprüfung der Deklaration schwierig wird, sobald die Aktivität im Faß inhomogen verteilt ist, oder z.B. ein Innenbehälter im Faß existiert.

Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit zwischen den Heißen Zellen des Instituts für Reaktorwerkstoffe und dem Zentralinstitut für Angewandte Mathematik der KFA Jülich ein Tomographie-Meßverfahren entwickelt und in den Heißen Zellen ein Meßplatz eingerichtet. Auf diesem können die erforderlichen Messungen zur Berechnung der Dichteverteilung wie auch der Aktivitätsverteilung in einer Faßebeine durchgeführt werden.

Mit Hilfe eines iterativ arbeitenden Rekonstruktionsprogramms wird aus den Meßkurven die Verteilung der Dichte oder der Aktivität in der gemessenen Faßebeine ermittelt, wie Beispiele an realen Abfallfässern sowie Testobjekten zeigen.

Eine Weiterentwicklung der Vorrichtung erlaubt in Zukunft eine Anwendung über den Laborrahmen hinaus, um stichprobenartig kontaminierte Abfälle zu überprüfen.

Einleitung

Radioaktive Abfälle fallen beim Betrieb kerntechnischer Anlagen sowie beim Umgang mit radioaktiven Stoffen an. Die Beschaffenheit des Abfalls ist wegen der unterschiedlichen Herkunft sehr verschieden. Radioaktive Abfälle, die bei Industrie, Gewerbe, Medizin und Forschung anfallen, werden in Landessammelstellen angeliefert und dort weiterverarbeitet, um z.B. das Volumen zu reduzieren. Weiterhin wird angestrebt, diese Abfälle zu fixieren; dies ist durch Einbinden in eine Zementmatrix möglich. Derartig konditionierte Gebinde werden dann für die Einlagerung in ein Zwischen- oder Endlager bereitgestellt.

Für den Betreiber eines Lagers ist es unverzichtbar, das radioaktive Inventar sowie die physikalischen und chemischen Eigenschaften der konditionierten Abfälle zu kennen, um einen sicheren Betrieb des Lagers zu gewährleisten. Grundlage dieser Abfallcharakterisierung sind Deklarationen der Abfallverursacher, in denen Art, Menge und Konditionierungsart der Abfälle beschrieben werden.

Im Jahre 1985 wurde in der KFA eine Produktkontrollstelle für radioaktive Abfälle eingerichtet (PKS), die es sich zur Aufgabe gemacht hat, Deklaration und Qualität der für eine Lagerung bereitgestellten konditionierten Abfälle zu prüfen. Im Rahmen dieser Prüftätigkeit wurde seitens des IRW/Heiße Zellen (Institut für Reaktorwerkstoffe) und des ZAM (Zentralinstitut für Angewandte Mathematik) ein tomographisches Untersuchungsverfahren entwickelt und experimentell erprobt, mit dem zum einen die Dichteverteilung und zum anderen die Aktivitätsverteilung in einer Abfallfaßebene ermittelt werden können. Durch eine derartige Untersuchung kann dann Auskunft z.B. über etwaige Innenbehälter als zusätzliche Abschirmung in einem zementierten Faß gegeben werden, was dann eine quantitative Aussage aufgrund der γ -Messung über das Aktivitätsinventar dieses Fasses ermöglicht.

Ziel der bisherigen Arbeiten war, einen möglichst einfachen Meßplatz zur Durchführung von Emissions-Computer-Tomographie (ECT)¹ einzurichten, d.h. die γ -strahlende Aktivitätsverteilung in einer Schnittebene zu messen, zum anderen sollte die Dichteverteilung mit Hilfe der Transmissions-Computer-Tomographie (TCT) gemessen werden können, d.h. das Objekt wird mit einer externen γ -Quelle durchstrahlt und die Schwächung dieser γ -Strahlung zur Berechnung der Dichteverteilung benutzt.

Ein weiteres Ziel bestand darin, Erfahrung auf dem Gebiet der Tomographie-Algorithmen zu sammeln, um zur Auswertung der Meßdaten das geeignete Rekonstruktionsverfahren für zweidimensionale Bilder zu finden.

Anregungen für diese Arbeit fanden sich in den Arbeiten von Müllauer/Behrens ([1.]) sowie von Reimers/Göbbels ([2.]).

¹ In dieser Arbeit ist mit ECT stets Single-Photon-Emission-Computer-Tomographie (SPECT) gemeint. In der Medizin wird unter ECT auch Positronen-Emissions-Tomographie (PET) verstanden.

Prinzip der tomographischen Messung und Aufbau des Meßplatzes

Um die Verteilung der Aktivität in einer Faßebene mit Hilfe der ECT darzustellen, müssen die Transversalprojektionen der γ -Konzentrationsverteilung, d.h. der Verlauf der senkrecht zur Faßachse in einer Richtung austretenden γ -Strahlung unter mehreren Winkelpositionen gemessen werden. Mit Hilfe eines Computerprogramms wird nun in der Meßebe eine Aktivitätsverteilung ermittelt, wobei die nach außen abgestrahlte γ -Strahlung berechnet und mit der gemessenen verglichen bzw. angenähert wird. Im einfachsten Fall wird das Faß an einem γ -Detektor schrittweise vorbeigeschoben, der durch ein Blendensystem (Kollimator) die vom Faß ausgehende Strahlung unter einem sehr kleinen Raumwinkel erfaßt (Abb. 1).

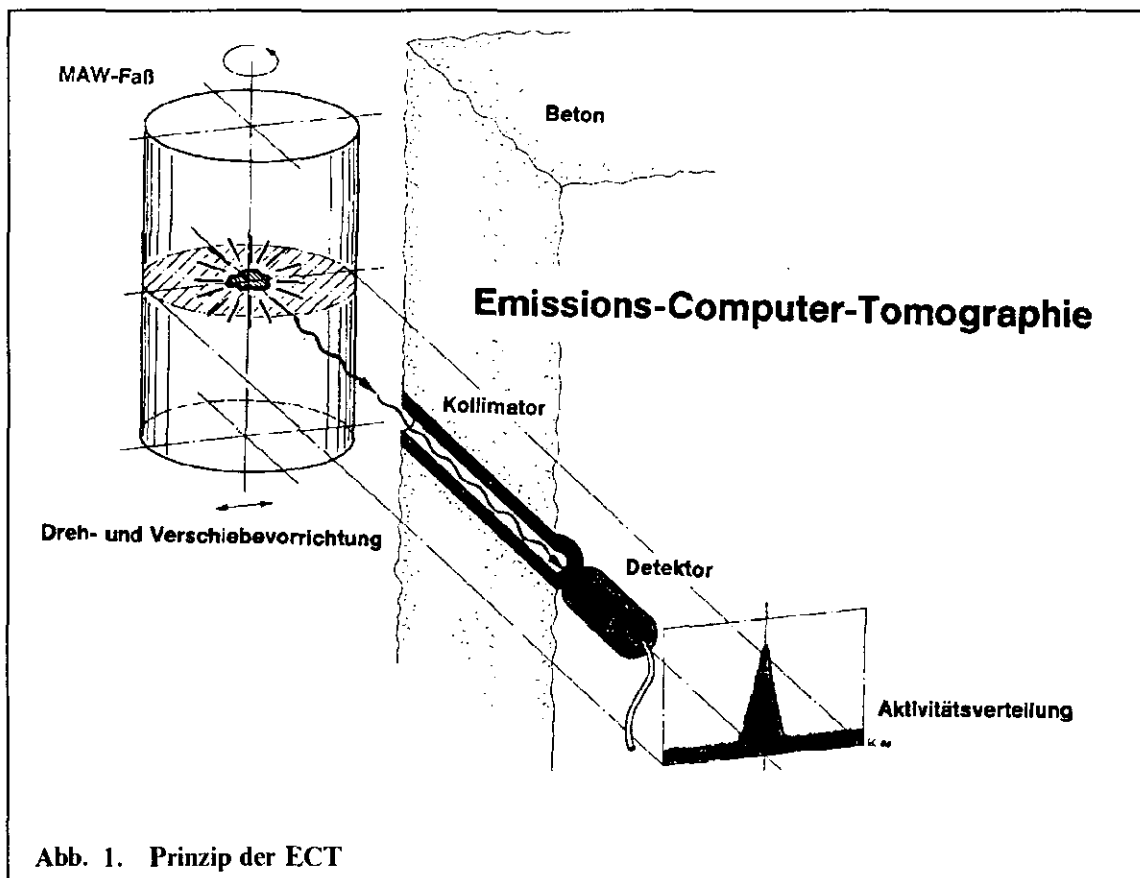


Abb. 1. Prinzip der ECT

Die auf den Detektor auftreffenden γ -Quanten haben unterschiedliche Energie und bewirken in Abhängigkeit von der Intensität der γ -Quelle entsprechend unterschiedliche Zählraten mit statistischen Schwankungen. Wenn zur Messung ein NaJ-Szintillationszähler oder ein Ge-Halbleiterdetektor benutzt wird, kann die γ -Strahlung energieabhängig registriert werden und γ -strahlende Nuklide aufgrund charakteristischer Photolinien mit diskreten Energien getrennt erfaßt werden. In Abb. 2 auf Seite 3 sind zwei charakteristische Energie-Spektren dargestellt, zum einen mit einem NaJ-Detektor, zum anderen mit einem Ge-Detektor, der ein wesentlich besseres Energieauflösungsvermögen aufweist.

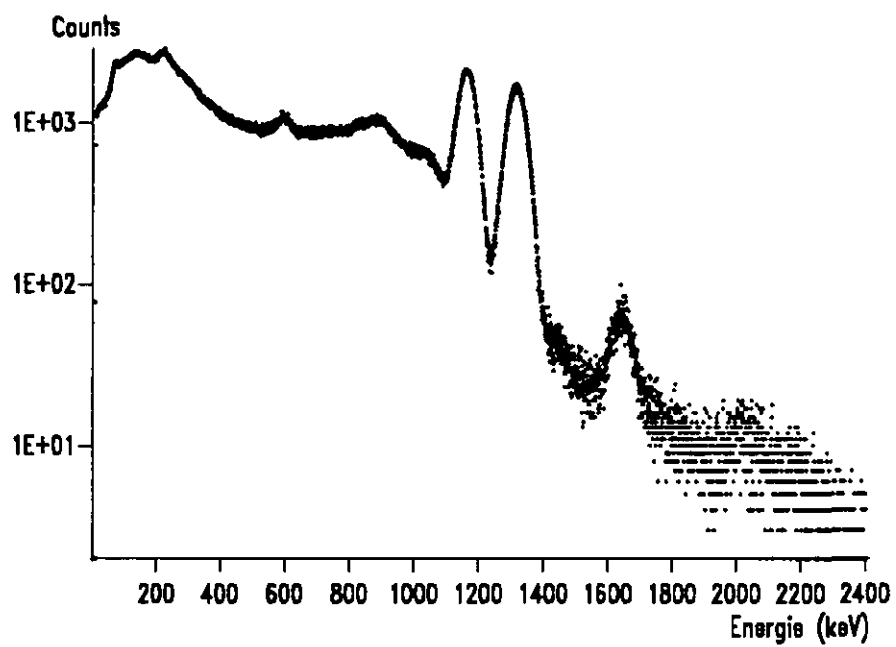
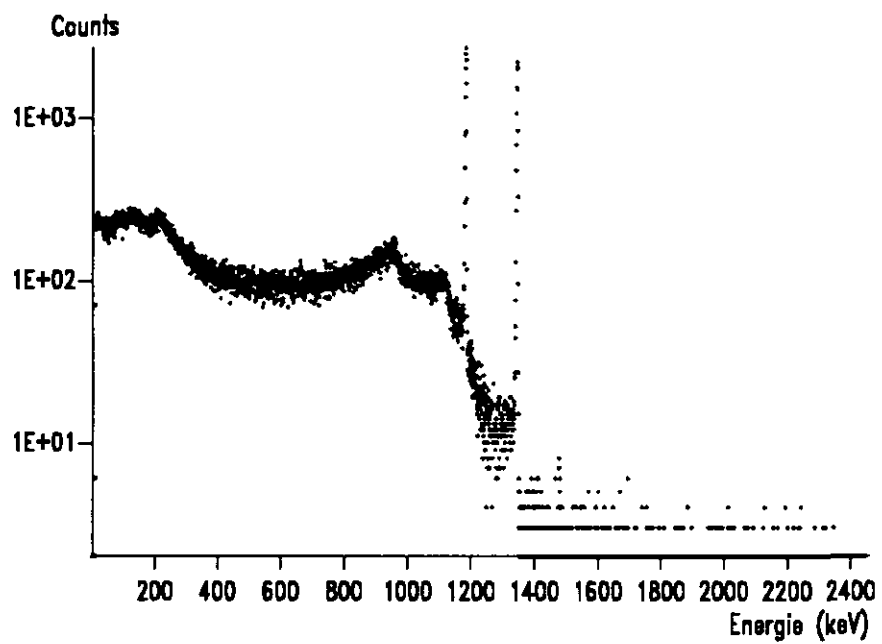


Abb. 2. ^{60}Co mit Ge-Detektor (oben) und mit NaJ-Detektor (unten)

Als Beispiel wurde das γ -Spektrum des Co60 gewählt, welches bei 1.17 MeV und 1.33 MeV zwei charakteristische Photolinien hat. Je nach Detektorart werden diese Photolinien als mehr oder weniger breite Peaks erfaßt, wobei die Fläche unter solch einem Peak repräsentativ für die Anzahl der Photonen ist, die den Detektor ungestreut, d.h. ohne Energieverlust treffen und absorbiert werden. Photonen, die beim Durchdringen eines Meßobjektes gestreut oder im Detektor nicht vollständig absorbiert werden, verlieren an Energie und bilden einen kontinuierlichen Untergrund, der bei der späteren Auswertung durch Berechnung der Peakflächen berücksichtigt werden muß.

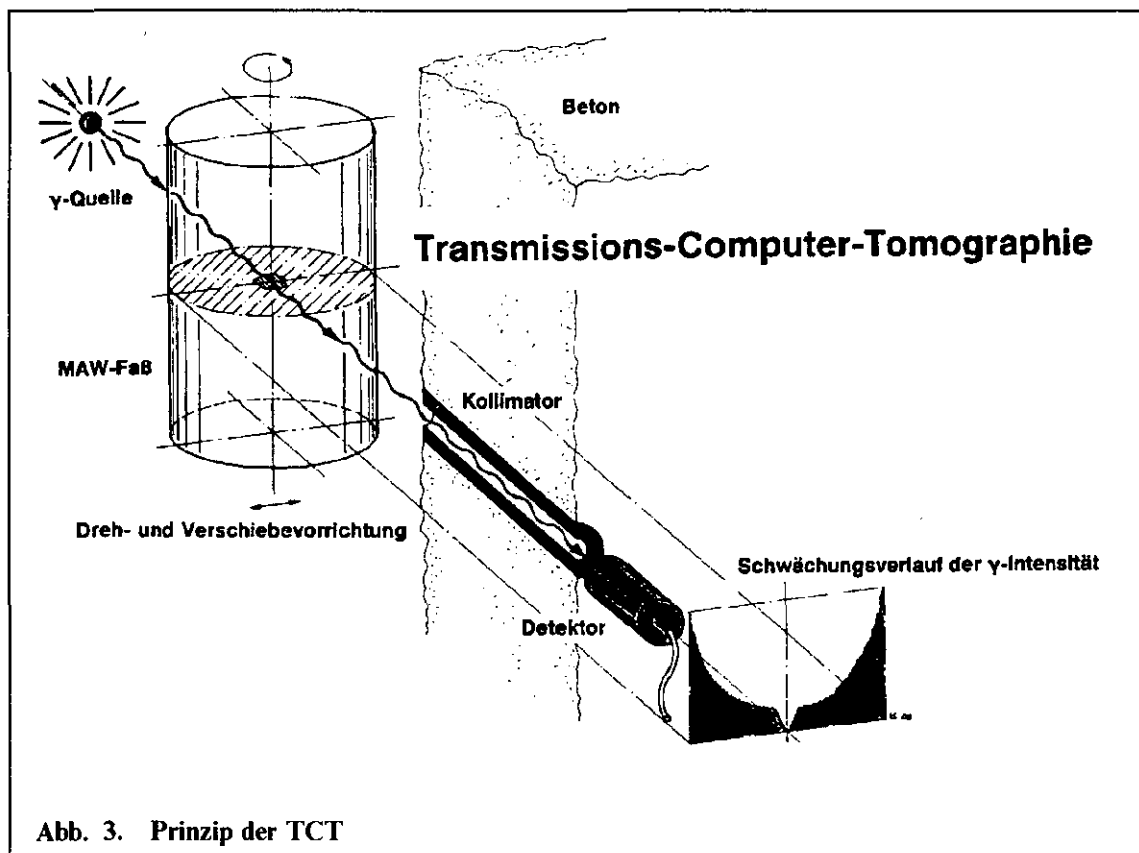
Aufgrund der hohen Energieauflösung eines Ge-Detektors ist diese Detektorart einem Szintillationsdetektor vorzuziehen. Dem entgegen steht ein um etwa den Faktor 10 höherer Preis und die Notwendigkeit, Ge-Detektoren mit flüssigem Stickstoff zu kühlen. Für die ECT ist die Verwendung eines Ge-Detektors jedoch unumgänglich, wenn ein Nuklidgemisch mit mehreren Photolinien, die energetisch eng beieinanderliegen, analysiert werden muß. Für die TCT ist die Verwendung eines Szintillationsdetektors möglich, da die hochenergetischen Photolinien z.B. des Co60 auch mit dieser Detektorart gut erfaßt werden können.

Die Auswertung eines Spektrums, d.h. der Flächeninhalt des Peaks, ergibt einen einzelnen Meßwert für die Verteilungskurve, die während der Querbewegung des Objekts aus vielen Einzelmessungen zusammengesetzt wird. Bei der Messung von Fässern wurden z.B. 100 Spektren für eine Verteilungskurve gemessen. Verschiedene Winkelpositionen können mit Hilfe eines Drehtellers eingestellt werden, auf dem das Faß zentriert steht.

Im vorliegenden Fall werden die Messungen in den "Heißen Zellen" durchgeführt, einem Labor, in dem radioaktive Stoffe gehandhabt und untersucht werden können. Die Daten werden mittels des in der KFA vorhandenen Datenübertragungsnetzes in das ZAM transferiert, um auf dem Großrechner das speziell konzipierte Tomographie-Rekonstruktionsprogramm einsetzen und testen zu können.

Um aus den verschiedenen Aktivitätsverläufen die Verteilung der Aktivität in der Meßebeane auch quantitativ berechnen zu können, muß das Absorptionsverhalten für γ -Strahlung in dem Meßobjekt bekannt sein. Falls ein Faß mit einem Material homogen gefüllt ist (z.B. mit zementiertem Abfall), kann für die gesamte Meßebeane das gleiche Absorptionsverhalten vorausgesetzt und bei der Rekonstruktionsrechnung berücksichtigt werden.

Schwierigkeiten treten auf, wenn die Aktivität, z.B. in einen separaten Abschirmbehälter gefüllt und dieser wiederum in einem Faß einzementiert wurde. In diesem Fall gibt es Zonen mit unterschiedlichem Absorptionsverhalten. Ohne Kenntnis der genauen Dichte- bzw. Absorptionsverhältnisse ist dann eine quantitativ richtige Rekonstruktion der Aktivitätsverteilung nicht mehr möglich. In diesem Fall wird eine Transmissions-Computer-Tomographie vorangestellt, mit der die Dichteverteilung in der Meßebeane ermittelt werden kann (Abb. 3 auf Seite 5).



Der Unterschied zur Emissions-Computer-Tomographie besteht lediglich darin, daß hinter dem Meßobjekt eine γ -Punktquelle positioniert wird, auf die das Detektor-Kollimator-System ausgerichtet ist. Die Messung erfolgt genau wie bei der ECT, nur wird jetzt die Schwächung der von der Punktquelle ausgehenden Strahlung durch das durch den Strahlengang geschobene Faß registriert. Die Punktquelle sollte aus Absorptionsgründen möglichst hochenergetische Photonen ($> 1\text{ MeV}$) abstrahlen und so aktiv sein, daß sie trotz der Absorption in Beton bei voller Faßbreite noch die Eigenstrahlung des Fasses deutlich übertrifft.

Die folgende Abbildung (Abb. 4 auf Seite 6) zeigt γ -Spektren einer Sb124-Quelle ohne und mit betoniertem Faß im Strahlengang zwischen Quelle und Detektor. Dabei wird deutlich, daß Absorption und Streuung im Beton zu sehr hohen Untergrundwerten und zu nicht mehr meßbaren Peaks im unteren Energiebereich führen.

Da sich als Durchstrahlungsquelle Co 60 mit den beiden γ -Photolinien mit Energien von 1170 keV und 1332 keV wegen guter Verfügbarkeit und langer Halbwertszeit (5,3 a) anbietet, in Abfallfässern aber gerade dieses Isotop bevorzugt vorkommt, kann es notwendig werden, die Meßwerte der Eigenstrahlung entsprechend zu berücksichtigen oder als Punktquelle ein Radionuklid zu wählen, welches im Abfall nicht vorkommt (z.B. Sb124). Der Gesamtaufbau der Meßanlage in den Heißen Zellen des IRW ist in Abb. 5 auf Seite 7 dargestellt.

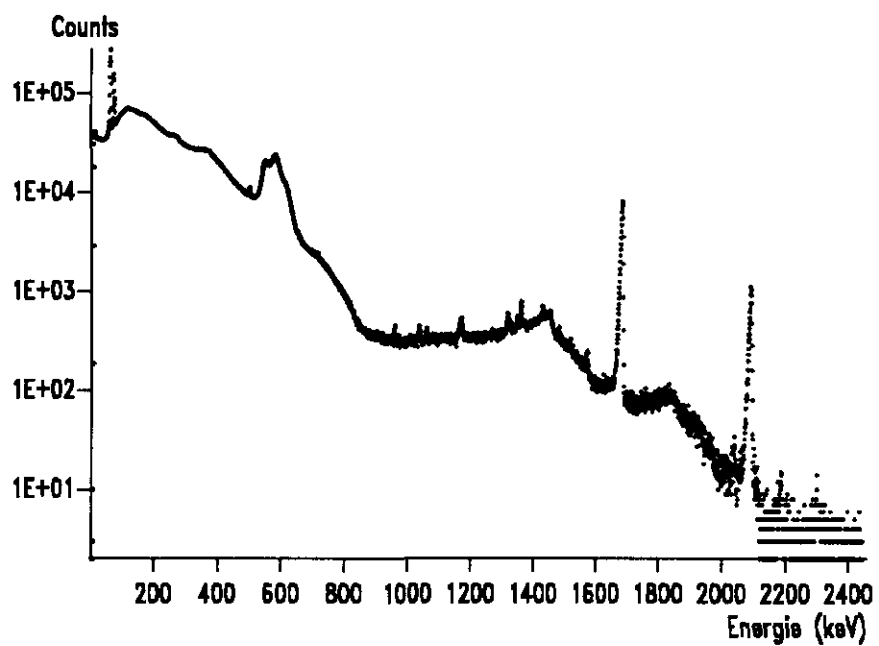
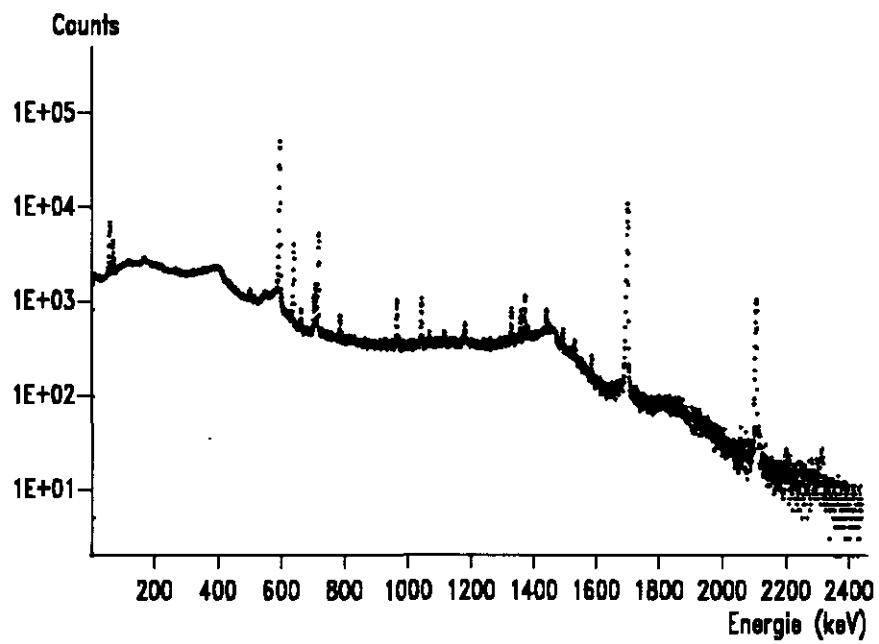
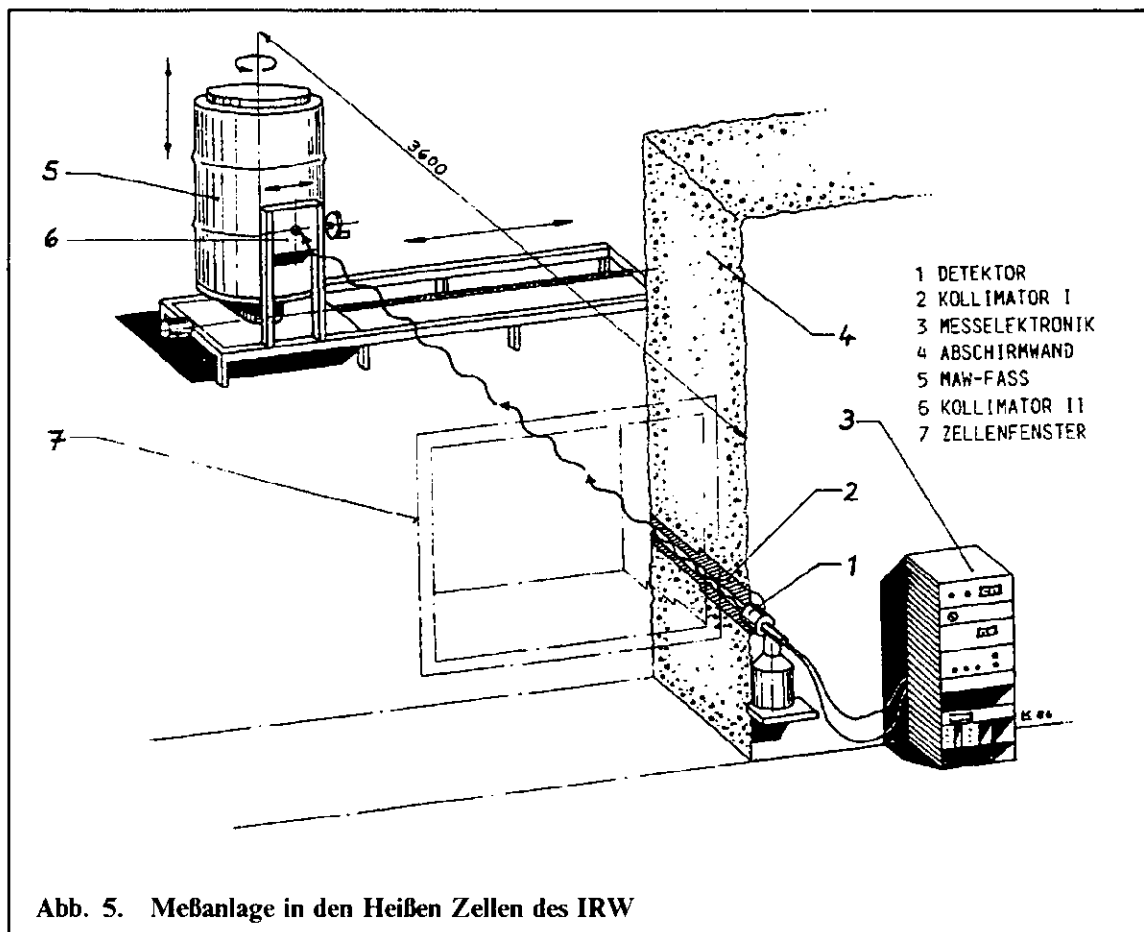


Abb. 4. Sb124-Quelle ohne (oben) und mit betoniertem Faß im Strahlengang (unten)



Das Faß steht auf einem Drehteller, der auf einer Verschiebeeinrichtung montiert ist. Beides wird durch Schrittmotoren bewegt. Da zum einen für die Durchstrahlung der Fässer eine Co 60-Quelle von 100 Ci benutzt wird, zum anderen Fässer mit sehr hoher Eigenstrahlung untersucht werden sollten, mußte die Apparatur hinter entsprechenden Abschirmwänden in den Heißen Zellen installiert werden. Als Kollimator-System gibt es eine direkt vor dem Faß positionierte Blei-Blende mit einer Öffnung von 1 cm Durchmesser und eine ebenso dimensionierte Öffnung in der Abschirmwand der Heißen Zelle. Als Detektor wird ein 3x3-NaJ-Szintillationszähler bzw. ein Ge-Detektor mit 20% Ansprechwahrscheinlichkeit benutzt, wobei durch eine Diskriminatorschwelle nur die γ -Quanten mit einer Energie größer als 1 MeV gemessen werden. Unerwünschte Streuanteile können somit ausgeschaltet werden.

Als Meßdatenerfassungssystem dient ein Personalcomputer mit eingesetzter Vielkanalanalysatorkarte. Auswertung der Spektren, Speicherung und Datentransfer zum ZAM können vom PC durchgeführt werden.

Prinzip der tomographischen Auswertung

Das Problem, eine Aktivitäts- oder Dichteverteilung in der Schnittebene eines Meßobjekts zu finden (Bildrekonstruktion), von der nur die außen meßbaren Verläufe, auch Projektionen genannt, bekannt sind, kann auf mehrere Arten gelöst werden.

Die unterschiedlichen Lösungsmethoden lassen sich im wesentlichen durch zwei Gruppen charakterisieren:

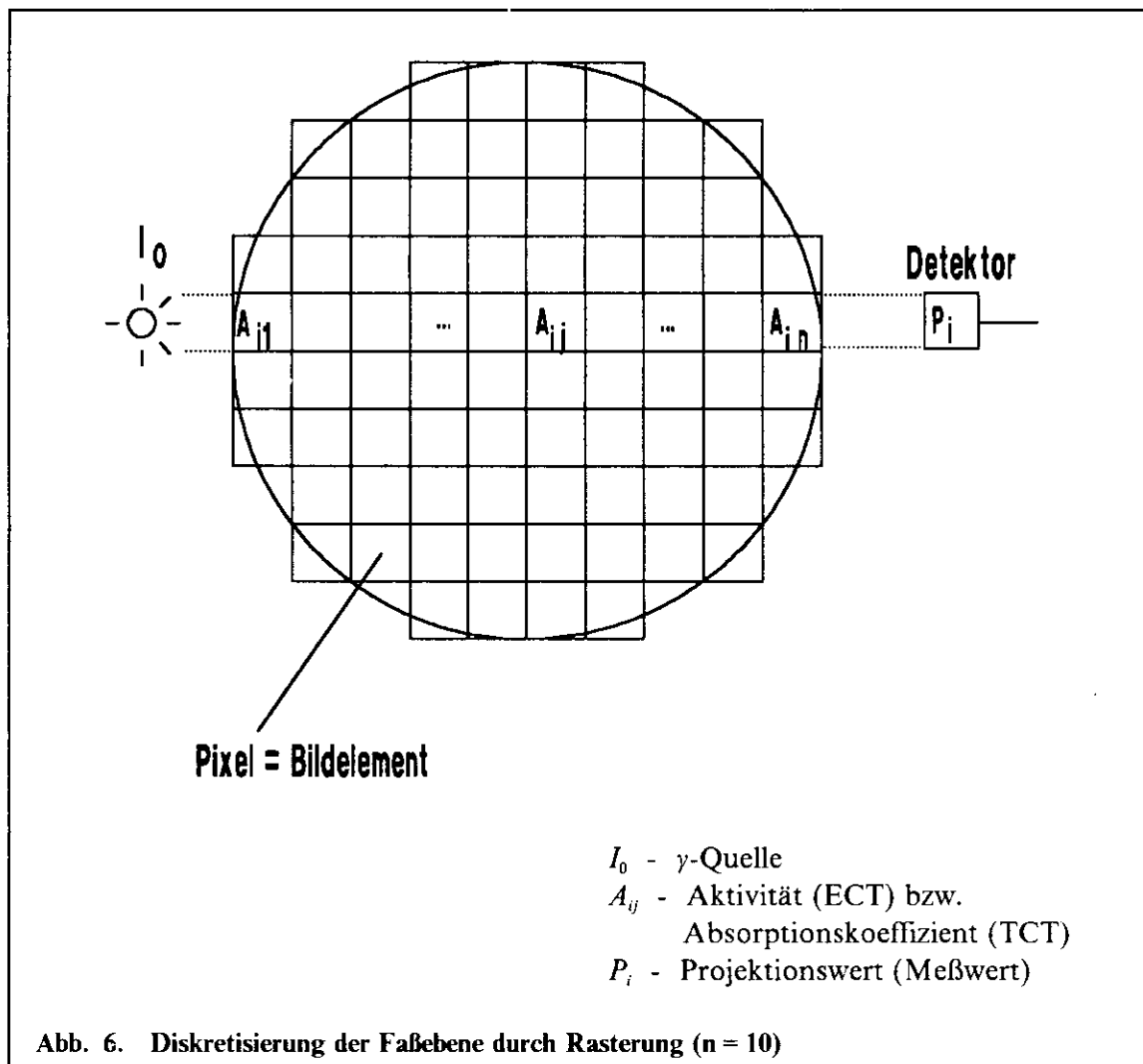
1. Die **analytischen Methoden** oder auch Transformationsmethoden gehen von der mathematischen Gesetzmäßigkeit aus, daß eine Funktion zweier Veränderlicher über dem Einheitskreis, die gewisse Regularitätsbedingungen erfüllt, eindeutig bestimmt ist durch die Integrale längs aller Geraden, die den Kreis schneiden. Die gesuchten Aktivitäts- und Dichteverteilungen lassen sich als solche Funktionen interpretieren und die Meßwerte entsprechen den Linienintegralen. Der Zusammenhang zwischen beiden läßt sich durch lineare Integralgleichungen beschreiben.

Johann Radon hat schon 1917 eine explizite Formel zur Lösung dieser linearen Integralgleichung veröffentlicht ([3.]). Man nennt daher die Integrale die Radon Transformaten der Funktion; die Berechnung der Lösung wird auch als inverse Radon Transformation bezeichnet. Diskretisierte Versionen der Radon'schen Formel bzw. von äquivalenten, mit Hilfe der mathematischen Analysis entwickelten Formeln bilden die analytischen Verfahren.

Diese werden technisch vornehmlich angewandt beim Einsatz der Tomographie (insbesondere TCT, PET) in der Medizin. Die wichtigsten Verfahren dieser Art sind die gefilterte Rückprojektion und die Fourier-Methoden (vergleiche den Überblicksartikel von Lewitt [4.])

Vorteil dieser Methoden ist ein vergleichsweise geringer Rechenaufwand und somit kurze Rechenzeiten. Nachteil der analytischen Methoden ist, daß das Objekt aus vielen Winkelpositionen gemessen werden muß. Die Verschiebelänge des Objektrandes bei der Winkelverstellung soll im Bereich der Bildraasterweite liegen. Kann man nicht von nahezu konstanter Absorption ausgehen, muß bei der ECT eine variable Schwächungskompensation durchgeführt werden; dies ist bei diesen Methoden schwierig (siehe Budinger in Herman [5.]).

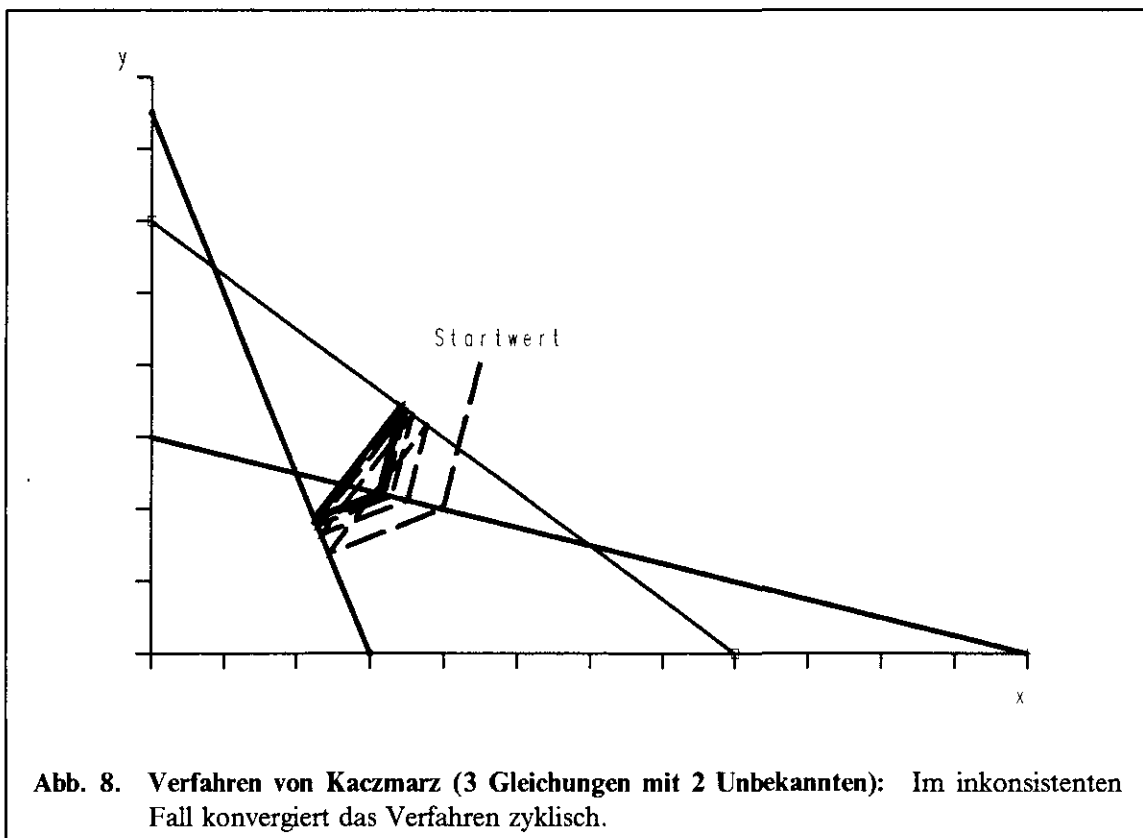
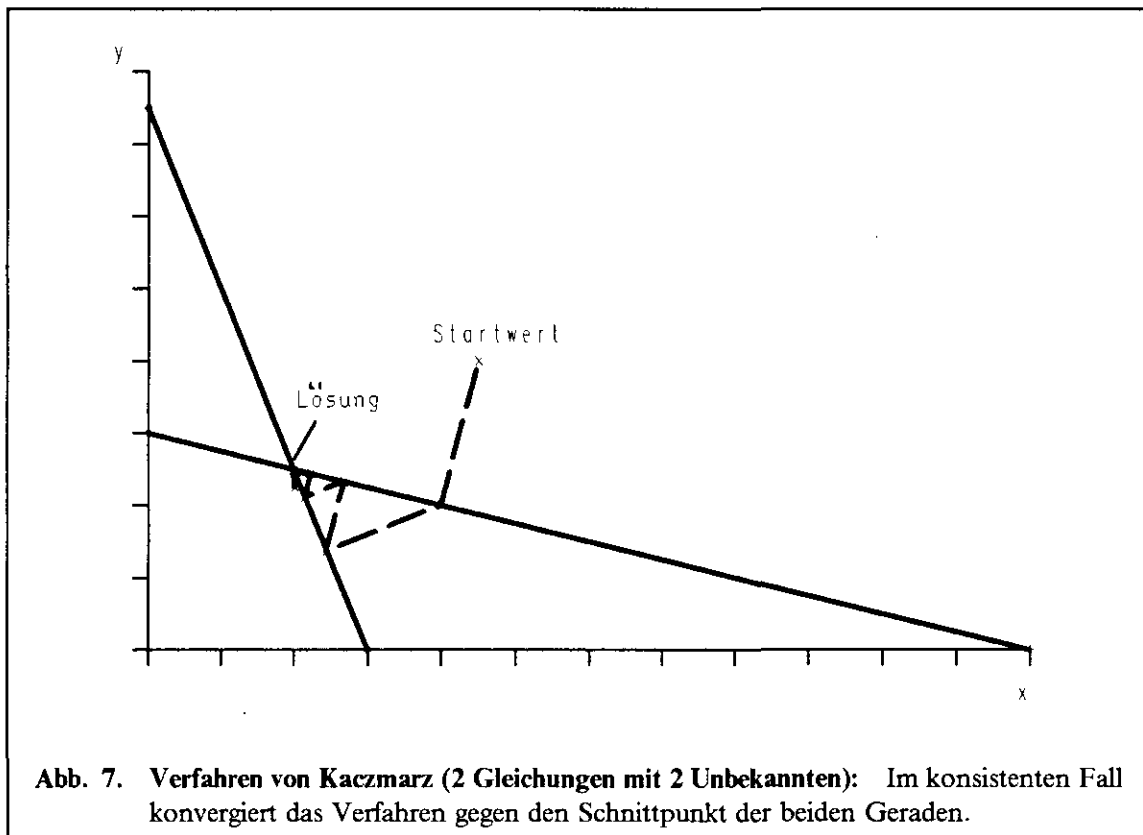
2. Die **iterativen Methoden** oder auch Reihenentwicklungsmethoden basieren auf der Diskretisierung des zu rekonstruierenden Querschnittbildes in einzelne Bildelemente, sogenannte Pixel (siehe Abb. 6 auf Seite 9). Innerhalb eines jeden Pixel nimmt man konstante Dichte bzw. Aktivität an. Die gesuchten Werte in jedem Pixel, also die Aktivitäten oder die Absorptionskoeffizienten A_{ij} , werden als Veränderliche in einem linearen Gleichungssystem beschrieben. Die Koeffizienten ergeben sich aus den geometrischen und physikalischen Bedingungen, die Meßwerte P_i bilden die rechten Seiten (Inhomogenität) des Systems.



Die Lösung der großen, meist unterbestimmten Gleichungssysteme wird iterativ bestimmt, etwa nach dem Verfahren von Kaczmarz ([6.]). Sie stellt immer eine Näherungslösung dar.

Kaczmarz' Algorithmus zur iterativen Lösung linearer Gleichungssysteme läßt sich am Beispiel zweier Gleichungen mit zwei Unbekannten geometrisch veranschaulichen. Jede der beiden Gleichungen stellt eine Gerade in der Ebene dar. Der Schnittpunkt der beiden Geraden ist die Lösung des Gleichungssystems. Dieser wird iterativ angenähert; dabei wird ausgehend von einem beliebigen Startwert der Näherungswert jeweils auf die andere Gerade orthogonal projiziert (vergleiche Abb. 7 auf Seite 10).

Das Verfahren konvergiert gegen eine Lösung, sofern diese existiert. Falls das Gleichungssystem aber inkonsistent ist, hat Tanabe ([7.]) gezeigt, daß zyklische Konvergenz vorliegt, d.h. das System konvergiert in einen stationären Zustand (siehe Abb. 8 auf Seite 10). Als Beispiel dienen drei, sich nicht in einem Punkt schneidende Geraden.



Censor ([8.]) vergleicht Reihenentwicklungsmethoden mit den Transformationsverfahren. Um eine befriedigende Bildrekonstruktion zu erreichen, sind bei der iterativen Methode weniger Winkelpositionen erforderlich als bei der analytischen, d.h. es müssen weniger Meßwerte erstellt werden. Dafür ist der Rechenaufwand etwas höher, was in Anbetracht der Leistungsfähigkeit moderner Computer jedoch kein Problem darstellt. Vor allen Dingen lassen sich die iterativen Methoden hinsichtlich abweichender Geometrien und anderer physikalischer Prinzipien anpassen. Die Berücksichtigung von a-priori Wissen über die Verteilung der Absorptionskoeffizienten (z.B. aus einer vorangegangenen TCT) ist bei der Emissionscomputertomographie leicht möglich, indem die Koeffizienten des Gleichungssystems entsprechend gewählt werden. Das Verfahren kann auf echte 3-dimensionale Rekonstruktion ausgedehnt werden; die Rekonstruktion von Verteilungen in Schnittebenen ist 2-dimensional. Neben diesen Aspekten führt Censor an, daß die Anwendung von Reihenentwicklungsmethoden sich als vorteilhaft bei Objekten mit starken Kontrasten erweist.

Unter diesen Gesichtspunkten wurde für die weitere Auswertung der Meßkurven ein iteratives Rekonstruktionsverfahren gewählt, zumal mit dieser Methode die sehr einfache Meßanlage mit nur einem Detektor alle erforderlichen Meßwerte seriell in einem angemessenen Zeitrahmen erfassen konnte.

Mathematisches Modell und Herleitung der Gleichungssysteme

1. Berechnung der Dichteverteilung

Wenn zwischen einem γ -Strahler und einem Detektor absorbierendes homogenes Material geschoben wird, dann sinkt die im Detektor registrierte Impulsrate einer bestimmten γ -Photolinie entsprechend der Beziehung

$$I_{\text{mess}} = I_0 e^{-\mu l}$$

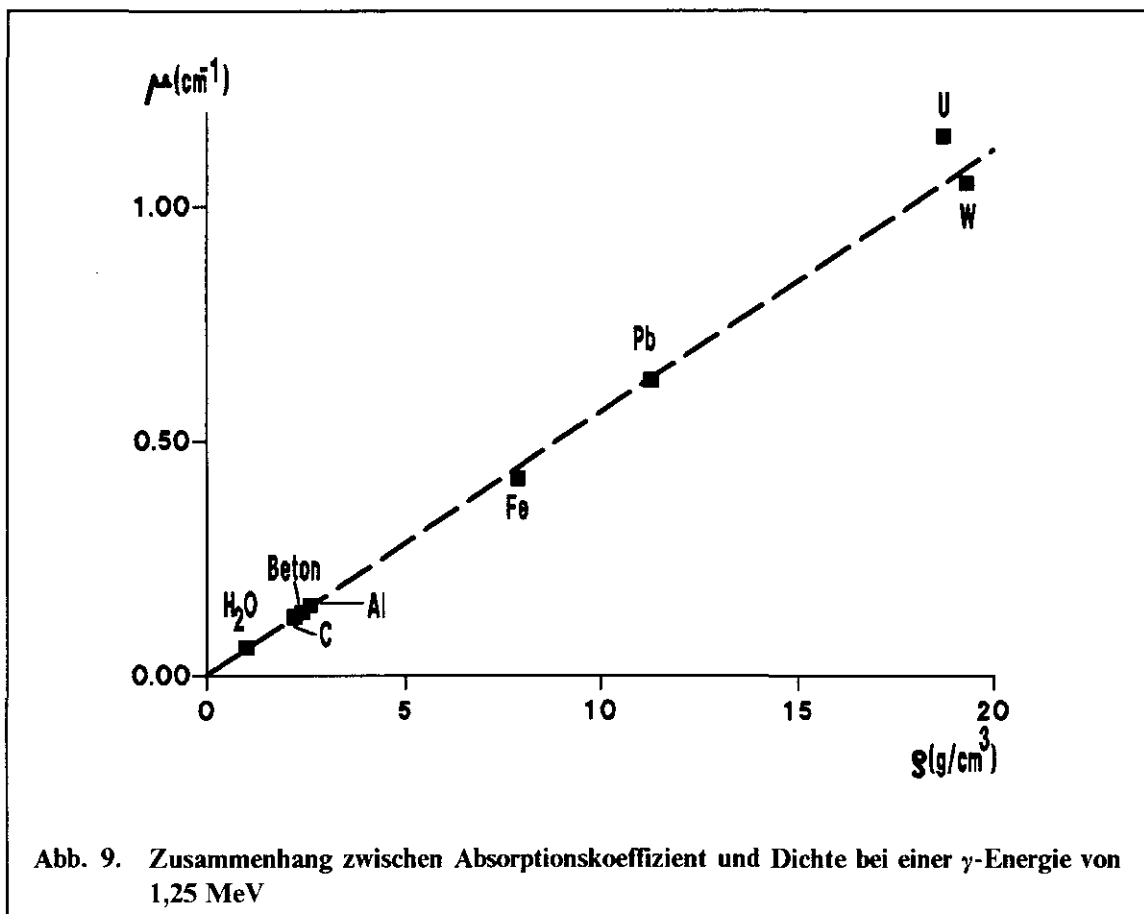
mit

I_0 gemessene Intensität ohne Absorber

μ Absorptionskoeffizient in Abhängigkeit von Material und γ -Energie

l absorbierende Länge des Materials

Bei monoenergetischer Strahlung ist μ nur noch materialabhängig und nahezu linear abhängig von der Dichte (Abb. 9).



In Fässern vorhandene Stoffe mit unterschiedlicher Dichte wie z.B. Eisen, Zement, Blei usw., können somit als Verteilung der dichtespezifischen Schwächungskoeffizienten $\mu(x,y)$ in der Rekonstruktionsebene dargestellt werden.

Dabei führt man in der Rekonstruktionsebene, die in diesem Fall eine Kreisfläche bildet, ein kartesisches Koordinatensystem mit Ursprung in der Mitte ein.

Die Projektionswerte I_{PRO} der längs der Geraden G geschwächten γ -Intensität I_0 (siehe Abb. 6 auf Seite 9) lassen sich somit unter Beachtung der Ortsabhängigkeit von $\mu(x,y)$ folgendermaßen beschreiben:

$$I_{PRO} = I_0 e^{-\int_G \mu(x,y) dx dy}$$

Das Integral ist das Linienintegral längs der Durchstrahlungsgeraden G (auch Radon Transformierte von $\mu(x,y)$ genannt).²

Bei Einteilung der absorbierenden Strecke in n Intervalle der Länge l , die jeweils der Länge eines Pixels entsprechen, ergibt sich z.B. in Koordinatenrichtung folgendes Absorptionsverhalten für die i'te Zeile, falls man innerhalb jedes Intervalls einheitliches Absorptionsverhalten annimmt :

$$I_{PRO_i} = I_0 e^{-\sum_{j=1}^n \mu_{ij} l}$$

Daraus folgt durch Logarithmieren :

$$\sum_{j=1}^n \mu_{ij} l = \ln(I_0) - \ln(I_{PRO_i}) = P_i$$

Dies stellt eine lineare Gleichung mit den Unbekannten μ_{ij} dar, deren rechte Seite P_i aus den Meßwerten bestimmt wird.

Wenn, wie beschrieben, ein Raster im kartesischen Koordinatensystem angelegt wird, dessen Bildelemente ein spezifisches μ und eine Kantenlänge von l aufweisen, dann läßt sich die oben beschriebene Berechnung nur in x- und y-Richtung durchführen.

Die Berechnung für andere Winkelpositionen muß unterschiedliche Absorptionslängen der Pixel längs der Durchstrahlungsgeraden berücksichtigen, je nachdem wie die Gerade die Rasterung schneidet. In der Praxis wird zudem ein Strahl mit endlicher Breite gemessen, der die Bildelemente mehr oder weniger teilweise erfaßt, was aufwendige Korrekturen der Absorptionsbeiträge der einzelnen Pixel erfordert (siehe Abb. 10 auf Seite 14).

² Durch Logarithmieren dieser Gleichung erhält man die lineare Integralgleichung der TCT; die o.a. analytischen Methoden lösen diese durch Diskretisierung der inversen Radon Transformation (siehe Herman [9.]) oder mathematisch äquivalenter Formeln.

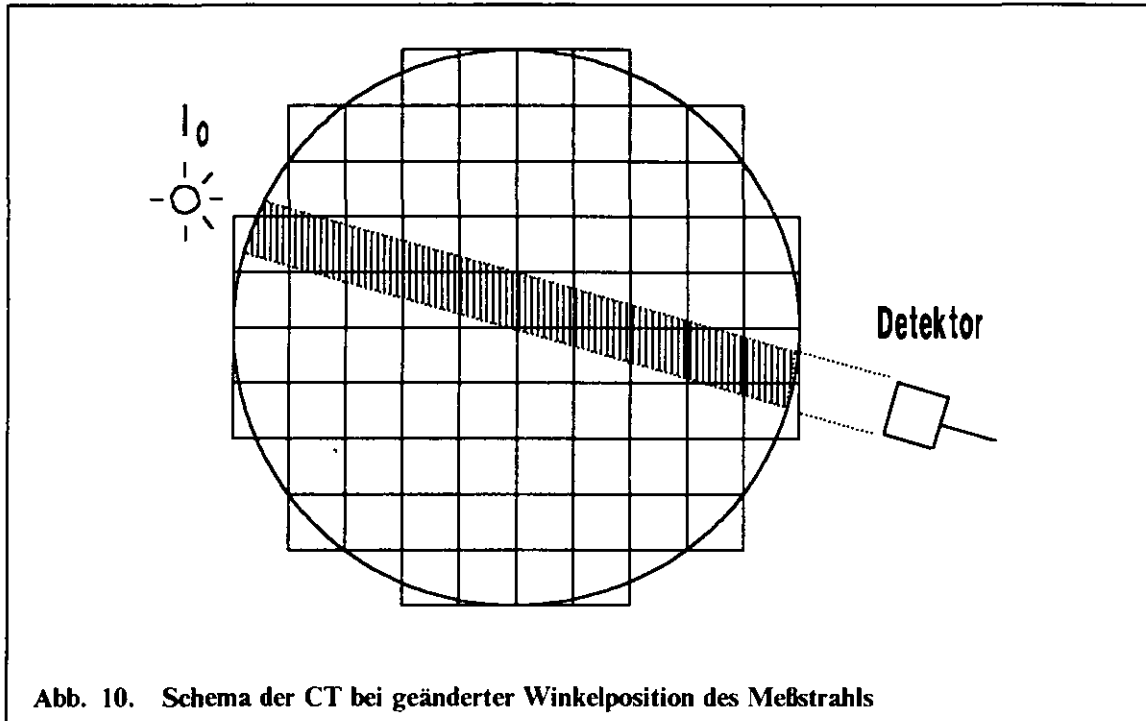


Abb. 10. Schema der CT bei geänderter Winkelposition des Meßstrahls

2. Berechnung der Aktivitätsverteilung

Die Berechnung der Aktivitätsverteilung in einem Meßobjekt setzt voraus, daß das Absorptionsverhalten in der Meßebe $\mu(v,w)$ bekannt ist. Denkt man sich nun in der Schnittebene ein kartesisches Koordinatensystem mit Ursprung in der Mitte gegeben, wird eine γ -Quelle der Intensität $I(x,y)$ an einer Stelle (x,y) vom Detektor mit folgendem Wert registriert:

$$I(x,y) e^{-\int_{\text{längs } G}^{\text{bis Detektor}} \mu(v,w) dv dw}$$

Dabei verläuft die Gerade G durch den Punkt (x,y) zum Detektor. Die Gesamtaktivität P_G aus Richtung der Geraden G ergibt sich durch Integrieren längs der Geraden G ³:

$$\int_G I(x,y) e^{-\int_{\text{längs } G}^{\text{bis Detektor}} \mu(v,w) dv dw} dx dy = P_G$$

³ Diese Gleichung ist die lineare Integralgleichung der ECT. Die rechte Seite ist die geschwächte Radon-Transformierte der Funktion $I(x,y)$. Die o.a. analytischen Verfahren benutzen diskretisierte Versionen der inversen Radon-Transformation zur Lösung.

Analog zur Vorgehensweise bei der TCT ergibt sich in Koordinatenrichtung bei Einführung eines Gitters in kartesischen Koordinaten für die ECT in der i 'ten Pixelreihe :

$$\sum_{j=1}^n I_{ij} e^{-\sum_{k=j}^n \mu_{ik} l} = P_i$$

Dies ist ein lineares Gleichungssystem in den Unbekannten I_{ij} , die rechte Seite entspricht den Meßwerten .

Die Berechnung für andere Winkelpositionen erfordert entsprechende Korrekturmaßnahmen für die Aktivitätsbeiträge bzw. für die Schwächungskoeffizienten der durch den Meßstrahl nur teilweise erfaßten Pixel.

Lösung des Gleichungssystems mit Hilfe der Algebraischen Rekonstruktionstechnik (ART)

Insgesamt werden für ein Rasterbild mit n^2 Bildelementen (Auflösung: $n \times n$) ebenso viele Aktivitätsbeiträge gesucht, wobei die Messung aus einer Winkelposition n Meßwerte ergibt. In der Praxis werden aus Zeitgründen weniger als n Winkelpositionen gemessen, so daß ein Gleichungssystem mit wesentlich weniger Gleichungen als Unbekannten zu lösen ist. Als Lösungsmethode bietet sich dabei ein iteratives Verfahren an, welches eine Näherungslösung für das Gleichungssystem erzeugt.

Dieses Verfahren ist 1970 von Gordon, Bender und Herman unter der Bezeichnung Algebraische Rekonstruktionstechnik (ART) veröffentlicht worden (siehe [10.]). Die ART ist im wesentlichen die Anwendung des Verfahrens von Kaczmarz auf die speziellen Probleme der Computertomographie. Unser Algorithmus entspricht für die TCT der ART. Für die ECT hat sich in der Praxis gezeigt, daß ein leicht modifiziertes Verfahren bessere Rekonstruktionen ergibt.

Ausgegangen wird von einer konstanten Verteilung der Aktivität (ECT) oder der Schwächungskoeffizienten (TCT) über alle Pixel, also⁴

$$\hat{I}_{ij} = const \quad \text{bzw.} \quad \hat{\mu}_{ij} = const$$

Mit dieser Anfangsbedingung wird der Projektionswert \hat{P}_i am Bildrand berechnet und mit dem entsprechenden Meßwert P_i verglichen. Die Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten beträgt

$$\Delta P_i = \hat{P}_i - P_i$$

Durch eine Korrekturfunktion werden alle zu einem Projektionswert gehörenden Bildelementwerte (d.h. Pixel längs einer Geraden durch die Bildebene) um einen Betrag verändert, der die vorher ermittelte Differenz zwischen Messung und Rechnung ausgleicht. Im Falle der ECT erfolgt die Berechnung des Korrekturanteils durch

$$\Delta_{ij} = \frac{\Delta P_i}{\sum_{j=1}^n e^{-\sum_{m=j}^n \mu_{im}}}$$

für die TCT ergibt sich (n Pixelanzahl):

$$\Delta_{ij} = \frac{\Delta P_i}{n}$$

Die neue Verteilung ergibt sich dann aus

$$\hat{I}_{ij}^{neu} = \max(\hat{I}_{ij}^{alt} + \Delta_{ij}, 0) \quad \text{bzw.} \quad \hat{\mu}_{ij}^{neu} = \max(\hat{\mu}_{ij}^{alt} + \Delta_{ij}, 0),$$

⁴ Mit \wedge werden Näherungswerte gekennzeichnet.

wobei berücksichtigt ist, daß negative Aktivitäten oder Absorptionskoeffizienten keinen Sinn haben; diese werden also auf 0 gesetzt.

Mit dem Ergebnis der Anpassung der ersten Projektionskurve werden die ursprünglich konstant angesetzten Bildelementwerte überschrieben und als Anfangsbedingung für die nächste Anpassung benutzt. Diese Rechnung wird für alle gemessenen Winkelpositionen durchgeführt.

Dabei wird die Rasterung jeweils entsprechend gedreht, wobei aus der angenäherten Verteilung auf dem nicht gedrehten Raster die Verteilung auf dem gedrehten Raster durch Interpolationsverfahren berechnet wird. Diese Vorgehensweise erlaubt eine besonders effiziente und speicherplatzsparende Implementierung des Verfahrens; es braucht nämlich jeweils nur einmal eine Koeffizientenmatrix der Ordnung $n \times n$ statt $n \times n \times m$ berechnet und abgespeichert zu werden, wobei $n \times n$ die Anzahl der Pixel und m die Anzahl der Winkel ist, aus denen gemessen wird. Die folgende Abb. 11 verdeutlicht den Kern des Verfahrens.

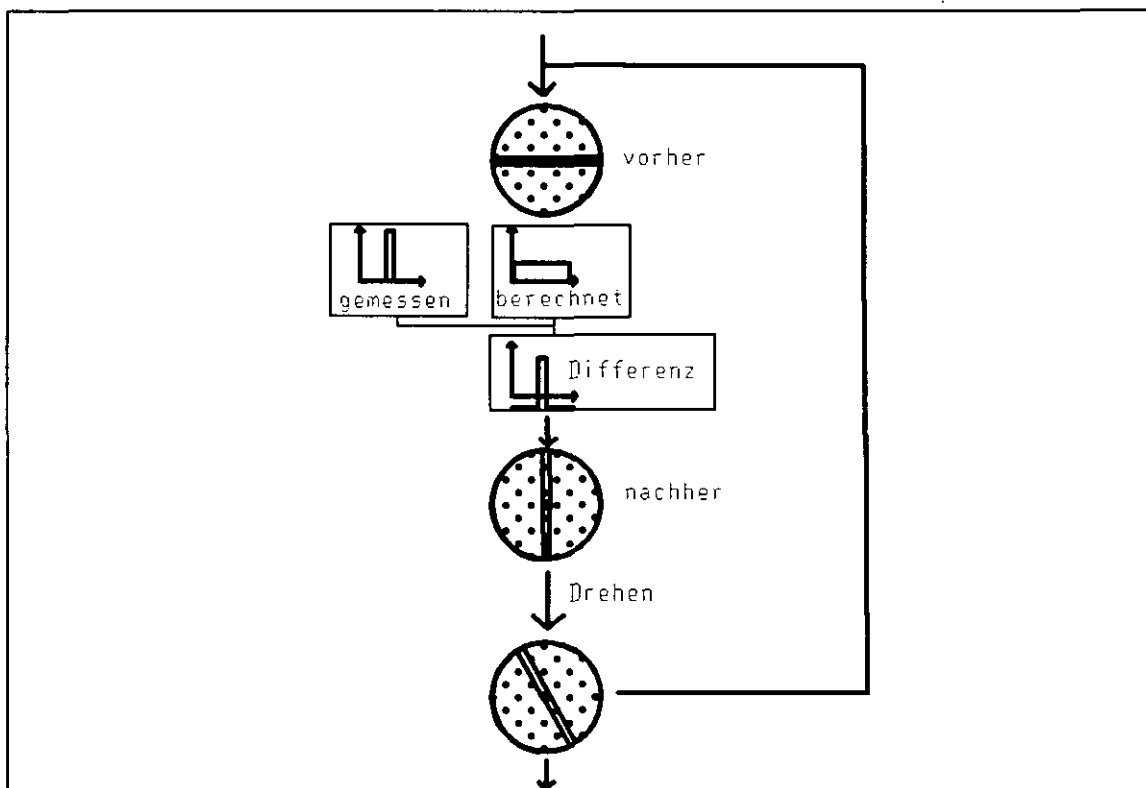


Abb. 11. Anpassung einer Näherungsverteilung an eine Meßkurve, anschließend Drehung: Ausgegangen wird von einer Anfangsverteilung (vorher), die aus einem waagerechten Wertestreifen in der Mitte des zu rekonstruierenden Kreises besteht. Zu dieser wird die Projektion in eine bestimmte Richtung, senkrecht nach unten, berechnet und mit der gemessenen Kurve verglichen. Die Differenz der beiden Kurven wird berechnet und mit deren Hilfe die Verteilung so korrigiert, daß die Meßkurve exakt angepaßt ist. Diese geänderte Verteilung (nachher) wird gedreht und dient als Ausgangspunkt für die nächste Anpassung.

Die sukzessive Anpassung aller Projektionskurven (1.Iteration) ergibt eine Näherungsverteilung, die die Anfangsbedingung für weitere Iterationen ist.

Erfahrungsgemäß sind nicht mehr als 5 Iterationen erforderlich. Die Beurteilung der Approximation während der Berechnung erfolgt durch Summenbildung der Quadrate der Bildelementänderungen (SQÄ). Tests mit simulierten exakten Daten zeigten, daß der Wert der SQÄ gegen 0 konvergiert. Bei realistischen Daten, die mit einem γ -Detektor gemessen wurden, führen jedoch statistische Schwankungen der Zählraten sowie Positionierungsungenauigkeiten aufgrund von Maschinenungenauigkeiten dazu, daß SQÄ nicht gegen 0 konvergiert, sondern lediglich ein stationärer Zustand erreicht wird. Die erreichte Approximation nach der i-ten Iteration stellt somit nur eine von vielen möglichen Näherungslösungen dar. Weitere Kriterien für die Beendigung der Rekonstruktion ergeben sich aus Maximum und Minimum der Verteilung, da diese ebenfalls gegen stationäre Werte konvergieren.

Während der letzten Iteration wird über die angepaßten Verteilungen jeder Projektion gemittelt. Dadurch wird verhindert, daß lediglich die letzte Projektion exakt, die anderen aber entsprechend schlecht angepaßt sind.

Zusammenfassend kann man den Algorithmus folgendermaßen beschreiben:

- Sukzessive Anpassung der Projektionskurven
- Jeweils *Drehung des Gitters und Interpolation*
- Mittelung während letzter Iteration

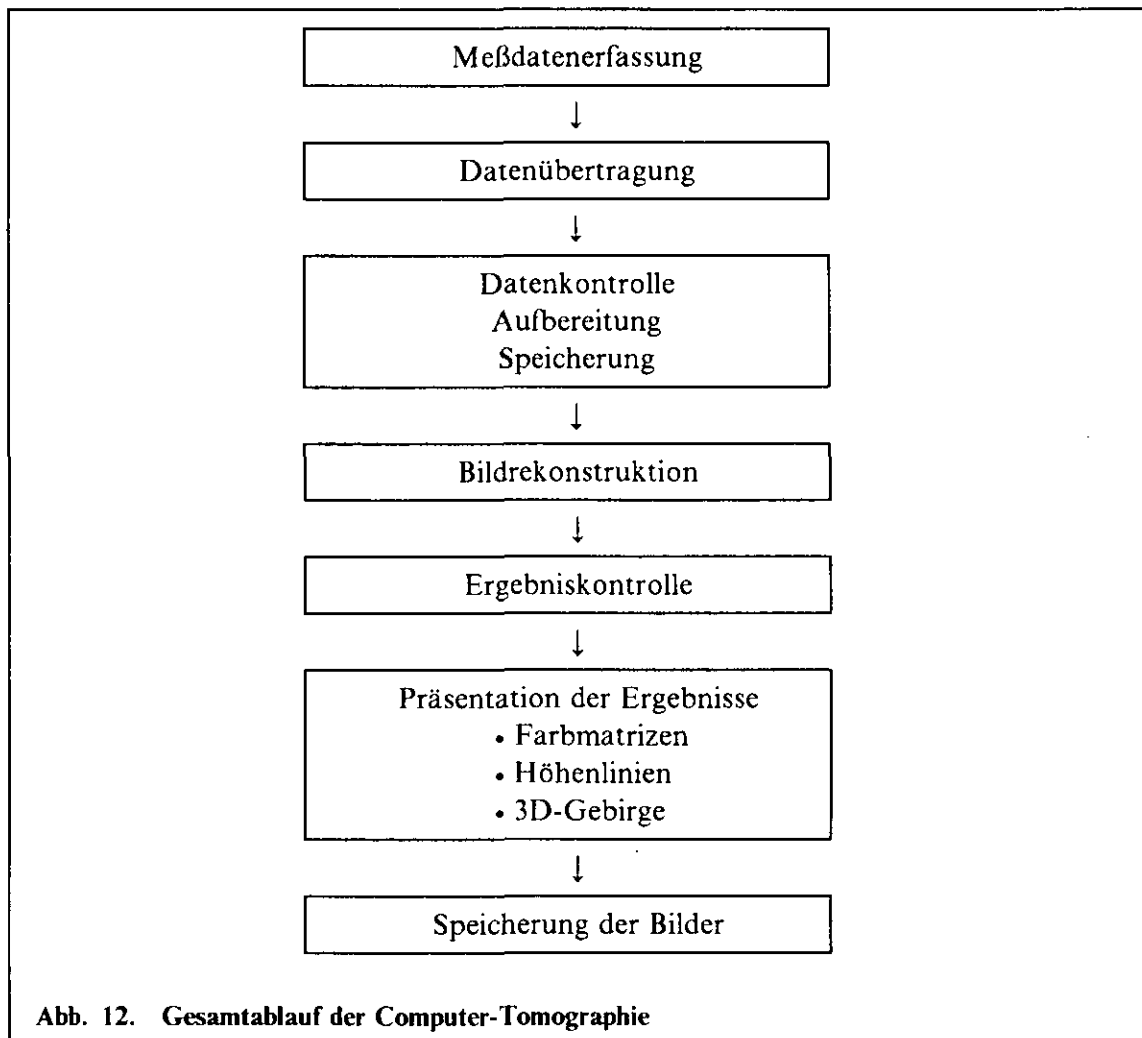
Die Vorteile sind :

- Speichereffizienz
- Kombinierte TCT - und ECT - Untersuchungen
- Spezielle Geometrien (wie viereckige Objekte)
- Robustheit gegenüber Meßfehlern und Modellabweichungen
- Minimale Anzahl von Projektionen
- 3 - dimensionale Rekonstruktion

Die Implementation der Verfahren erfolgte in FORTRAN77 auf verschiedenen Rechnern (IBM3090, CRAY XMP/22, IBM PS 2 Model 80). Die folgende Tabelle enthält einige Zeiten für die TCT-Rekonstruktion einer Ebene bei verschieden feiner Rasterung (Auflösung); dabei konnte aus Speicherplatzgründen auf dem PS 2/80 lediglich die 64x64 Rasterung gerechnet werden.

Rechenzeitvergleich TCT-Rekonstruktion einer Ebene (Sekunden)			
Auflösung	256x256	128x128	64x64
CRAY X-MP/22	6.78	1.80	0.57
IBM 3090	57.60	12.00	2.90
PS 2/80			1200,00

Abb. 12 auf Seite 19 gibt einen Überblick über den Aufwand an Datenverarbeitung, der zur Erstellung einer Computertomographie notwendig ist.

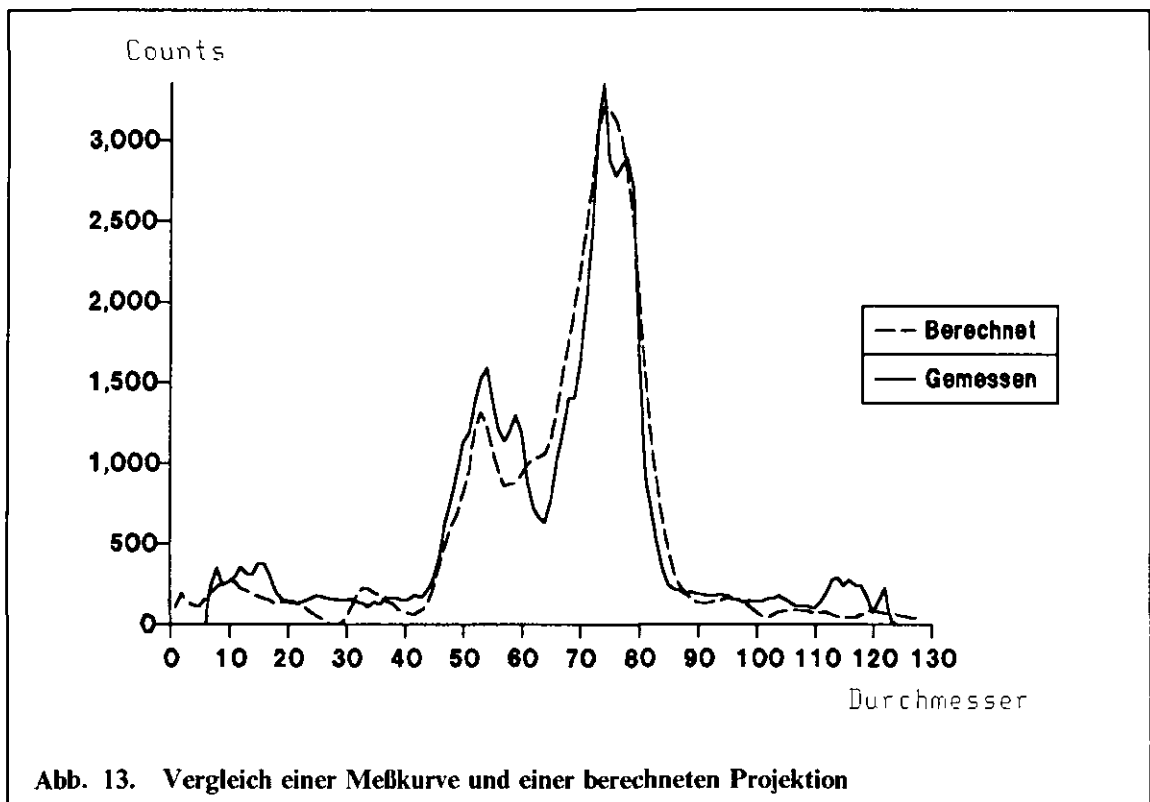


Die Meßdatenerfassung erfolgt in den Heißen Zellen des IRW mit einem Personalcomputer mit Multi-Channel-Analyser-Board.

Bevor die Bildrekonstruktion durchgeführt werden kann, müssen die Daten kontrolliert und aufbereitet werden. Die TCT-Daten müssen transformiert werden (Logarithmieren, Invertieren); bei den ECT-Daten ist das Bestimmen des Drehzentrums besonders problematisch, falls der Mittelpunkt des zu untersuchenden Objektes nicht mit dem Rotationspunkt übereinstimmt. In jedem Fall ist eine optische Kontrolle der Meßwerte nötig, um Ausreißer und Falscheinstellungen zu erkennen.

Sind die Daten so aufbereitet, werden sie geeignet abgespeichert. Nach diesen Vorbereitungen kann man mit dem oben beschriebenen Rekonstruktionsverfahren eine Absorptionskoeffizienten- bzw. Aktivitätsverteilung berechnen.

Bevor eine berechnete Verteilung akzeptiert wird, muß deren Güte bestimmt werden. Dazu werden die Meßdaten und diejenigen Projektionskurven, die sich aus dem berechneten Bild ergeben, verglichen (Abb. 13 auf Seite 20).



Große Unterschiede zwischen den beiden Kurven deuten auf Fehler im Verfahren, meist aber auf Meßfehler hin. Gegebenenfalls sind zusätzliche Messungen nötig.

Die Präsentation der Ergebnisse durch graphische Darstellung der Verteilungen ist auf verschiedene Arten möglich. Beispiele für die Darstellung durch Farbmatrizen, manchmal auch Farbkodierung genannt, sind im folgenden Kapitel enthalten. Man kann die Verteilungen aber auch durch ihre Höhenlinien oder als 3D-Gebirge darstellen (siehe Abb. 25 auf Seite 32).

Eine effiziente Speicherung der Bilder ist durch Zuweisung der Verteilungswerte auf jeweils ein Byte mit einem Wert zwischen 0 und 255 realisiert worden; es können also 256 verschiedene Wertabstufungen unterschieden werden. Ein Bild mit 128x128 Pixel benötigt somit 16 Kbyte Speicherplatz.

Anwendung des Verfahrens

Die Überprüfung von Rekonstruktionsalgorithmen ist

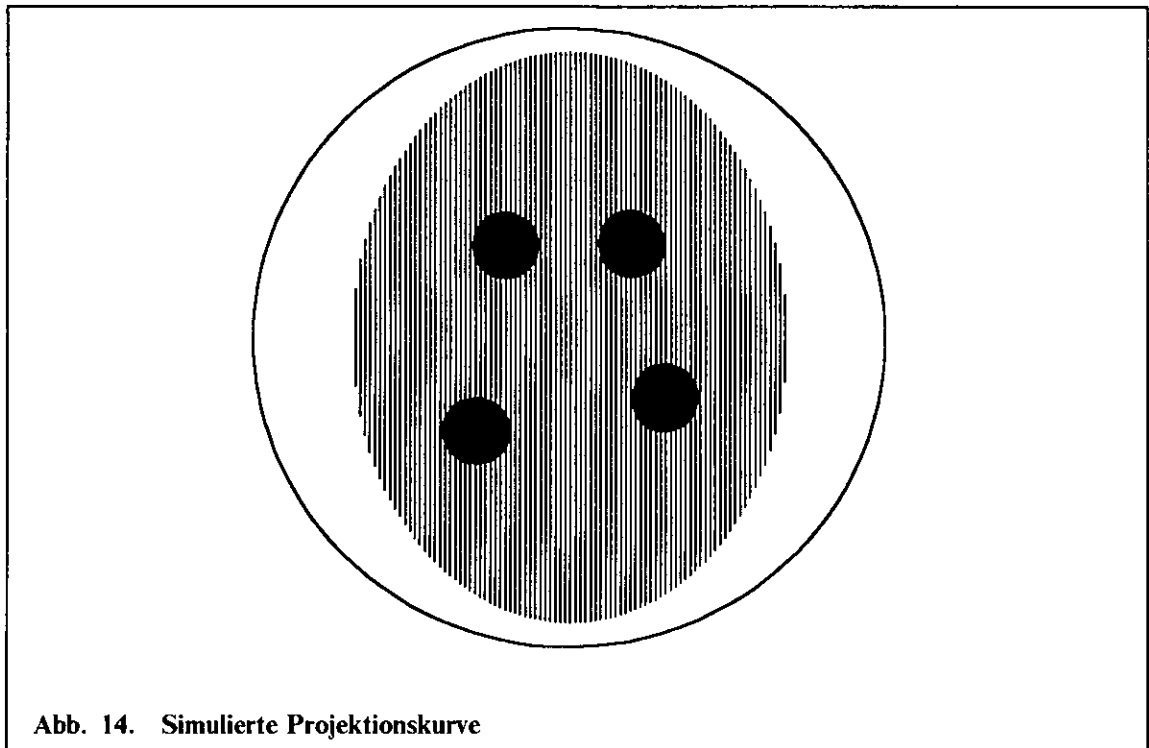
- durch Vergleich mit den Ergebnissen bewährter Methoden
- mit mathematischen Phantomen (Simulation)
- anhand realer Phantome (Tabletts aus Graphit- und Brennelementkugeln)
- durch abschließende zerstörende Prüfung (Abfall-Fässer)

möglich.

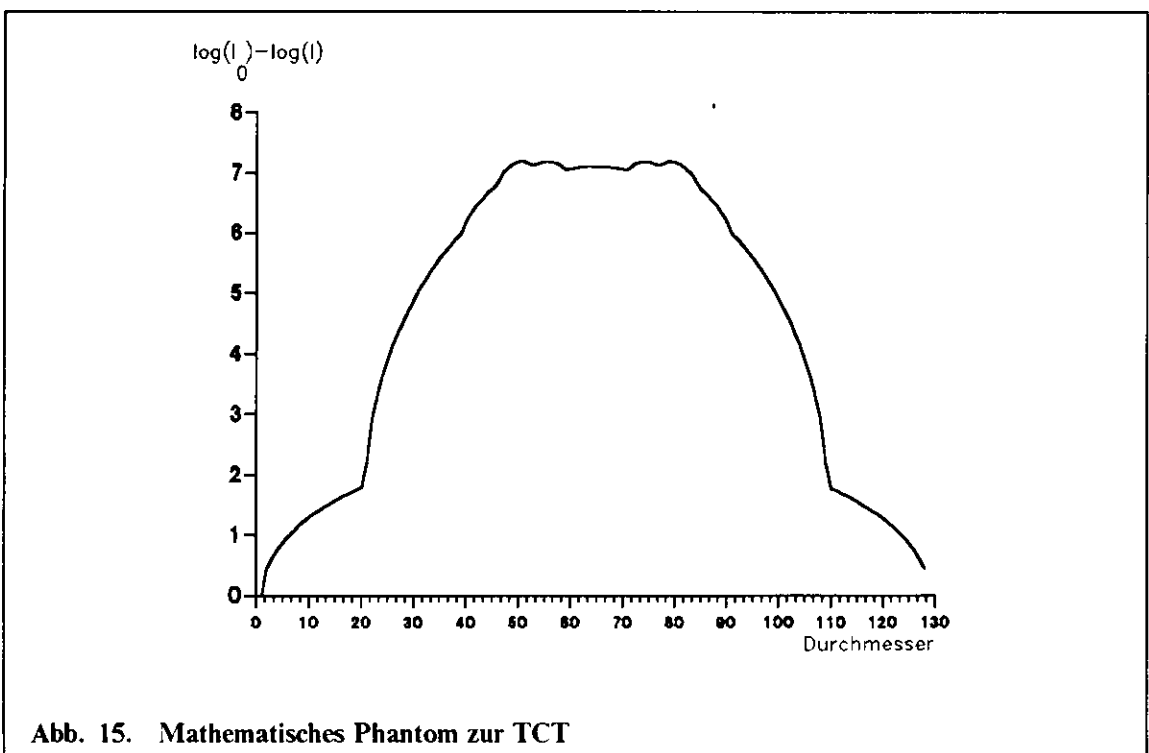
Wir haben unsere Verfahren verglichen mit den Ergebnissen eines kommerziellen, medizinisch genutzten Computertomographen anhand von ECT-Daten eines menschlichen Gehirns; dabei standen 64 Projektionskurven mit je 64 Werten zur Verfügung. Zwischen den beiden mit unterschiedlichen Rekonstruktionsprogrammen berechneten Verteilungen bestand kein wesentlicher Unterschied. Allerdings bestehen wesentliche Unterschiede in den physikalischen Randbedingungen zwischen der medizinischen Praxis und unserem Untersuchungsziel, der zerstörungsfreien Prüfung von Abfallfässern. Insbesondere treten in der Materialforschung grössere Dichteunterschiede auf, die Objektdurchmesser sind grösser und die Meßzeiten nicht so beschränkt; es genügt eine statische off-line Rekonstruktion, während in der Medizin dynamische on-line Ergebnisse erwünscht sind. Ausserdem ist das Ziel einer ECT-Untersuchung eines Abfallfasses die Bestimmung des unbekannten Nuklidinventars, während im medizinischen Bereich nur ein bekanntes Nuklid injiziert wird.

Eine weitere Möglichkeit zum Test von Rekonstruktionsalgorithmen ist die Anwendung mathematischer Phantome. Ein mathematisches Phantom ist ein gedachtes Verteilungsmuster von Absorptionskoeffizienten bzw. Aktivitäten in einer Schnittebene. Aus einem beliebigen Verteilungsmuster werden mit einem Computer die zugehörigen Projektionskurven, also die Integrale längs der Geraden in eine Richtung, berechnet; eventuell wird mit einem Zufallszahlengenerator der Meßfehler simuliert. Die so entstandenen Projektionen entsprechen den MEßwerten und werden als Eingangsgrößen des Tomographie-Verfahrens benutzt. Die rekonstruierten Verteilungen werden mit den ursprünglich gewählten Mustern verglichen. Verschiedene Simulationen sind durchgeführt worden.

Die Abb. 14 auf Seite 22 zeigt ein mathematisches Phantom zum Test des TCT-Algorithmus, also ein Verteilungsmuster von Absorptionskoeffizienten. Es besteht aus einem Kreis mit Radius 40 cm der Dichte 1, in den eine Ellipse mit den Radien 25 cm und 37 cm der Dichte 2 einbeschrieben ist. In der Ellipse befinden sich vier Kreise mit einem Radius von je 8 cm und einer Dichte von 4.



Ein Computerprogramm berechnet aus dieser Verteilung Projektionen in 16 Richtungen mit je 128 Werten. Eine dieser Projektionen ist in Abb. 15 dargestellt.



Aus diesen 16 Projektionen wurde die Dichte rekonstruiert. Die Abb. 16 auf Seite 23 zeigt das Ergebnis nach einer, zwei, fünf und zehn Iterationen.

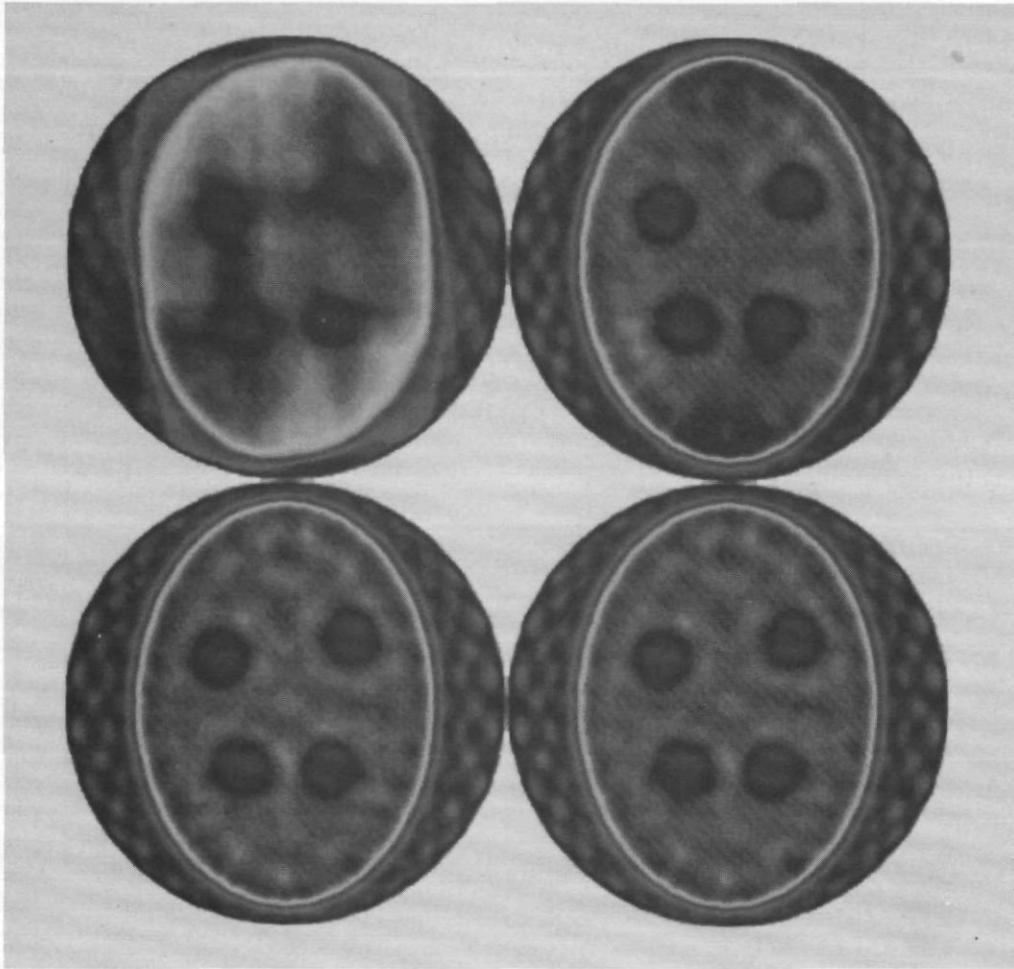


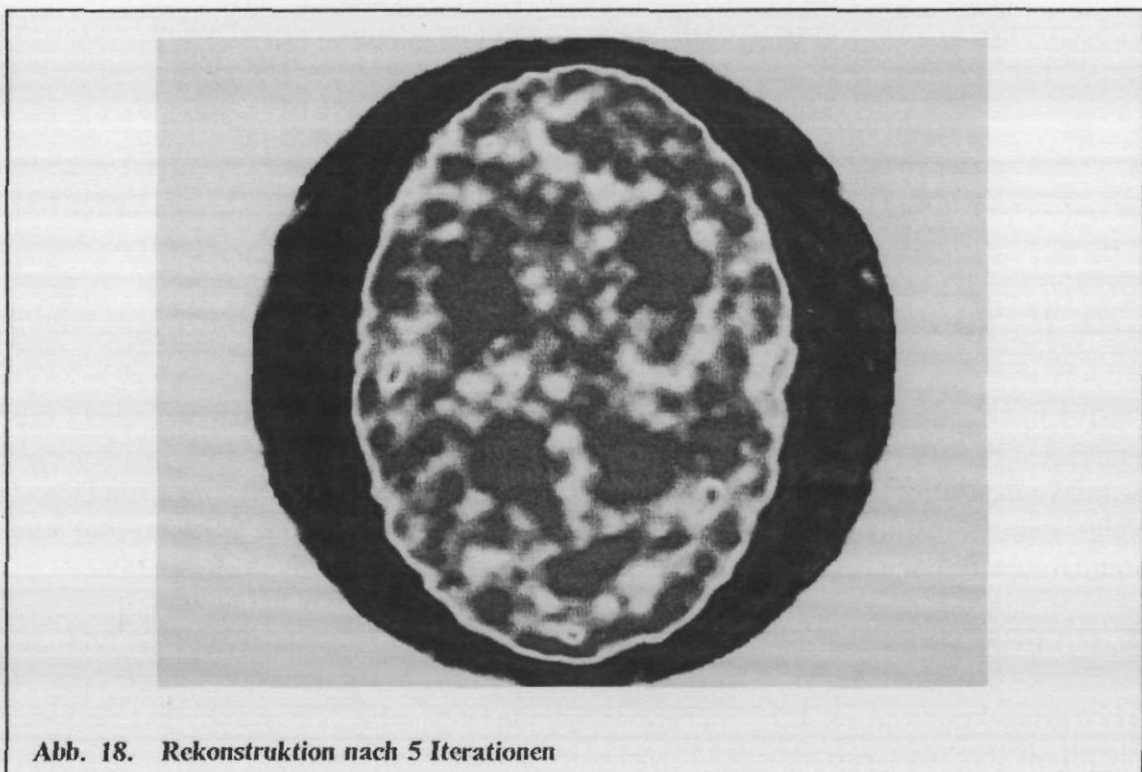
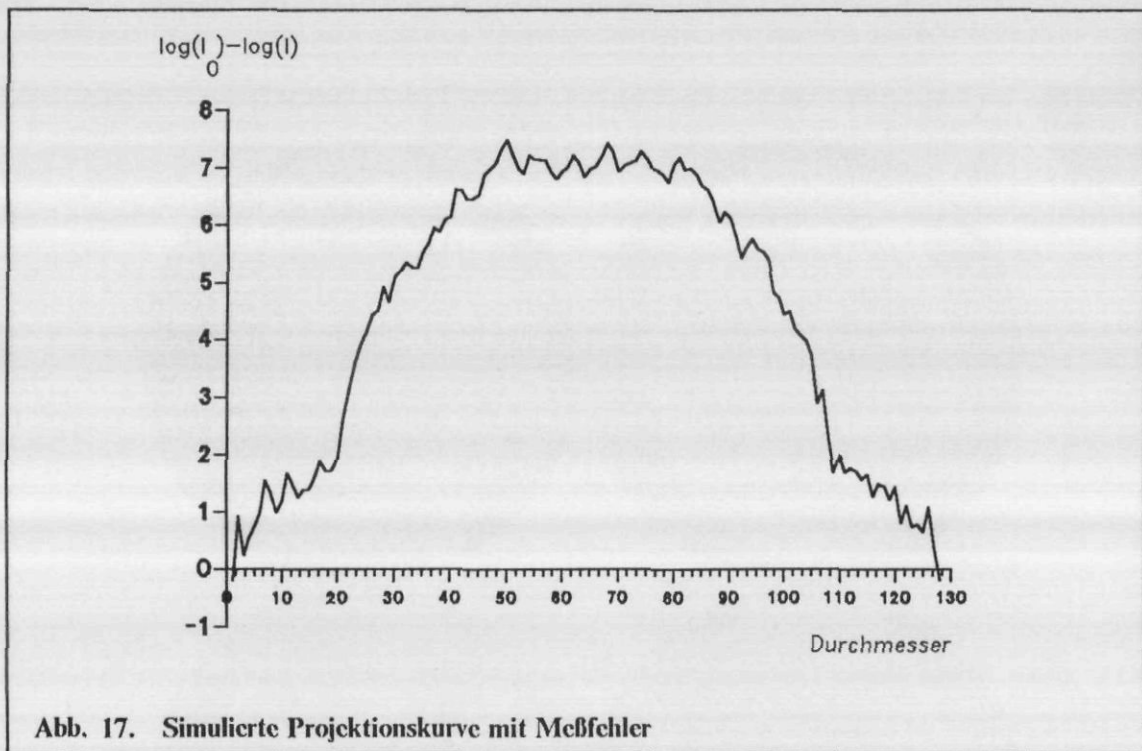
Abb. 16. Rekonstruierte Verteilung nach 1,2,5,10 Iterationen

Die rekonstruierte Verteilung nach 5 Iterationen ändert sich bei den weiteren Iterationen nicht mehr.

Benutzt man zusätzlich einen Zufallszahlengenerator, um den Meßfehler zu simulieren, ergibt sich etwa durch Addition einer normalverteilten Größe mit Mittelwert 0 und Standardabweichung 0.25 etwa folgende Projektion (siehe Abb. 17 auf Seite 24).

Nach 5 Iterationen erhält man die in Abb. 18 auf Seite 24 abgebildete Rekonstruktion.

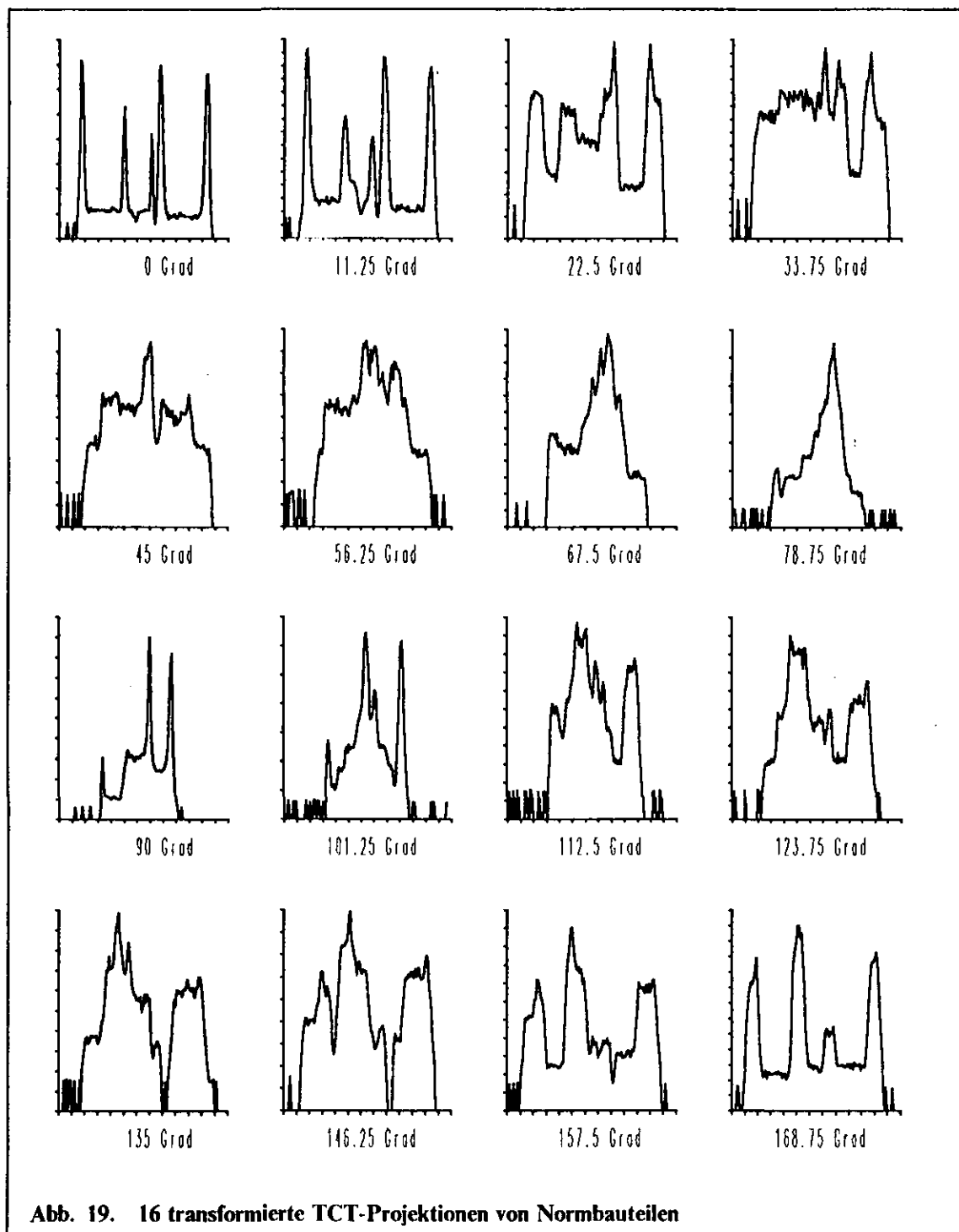
Die Aussagekraft von solchen Simulationsrechnungen ist allerdings beschränkt, da nicht alle physikalischen Gegebenheiten berücksichtigt werden können.



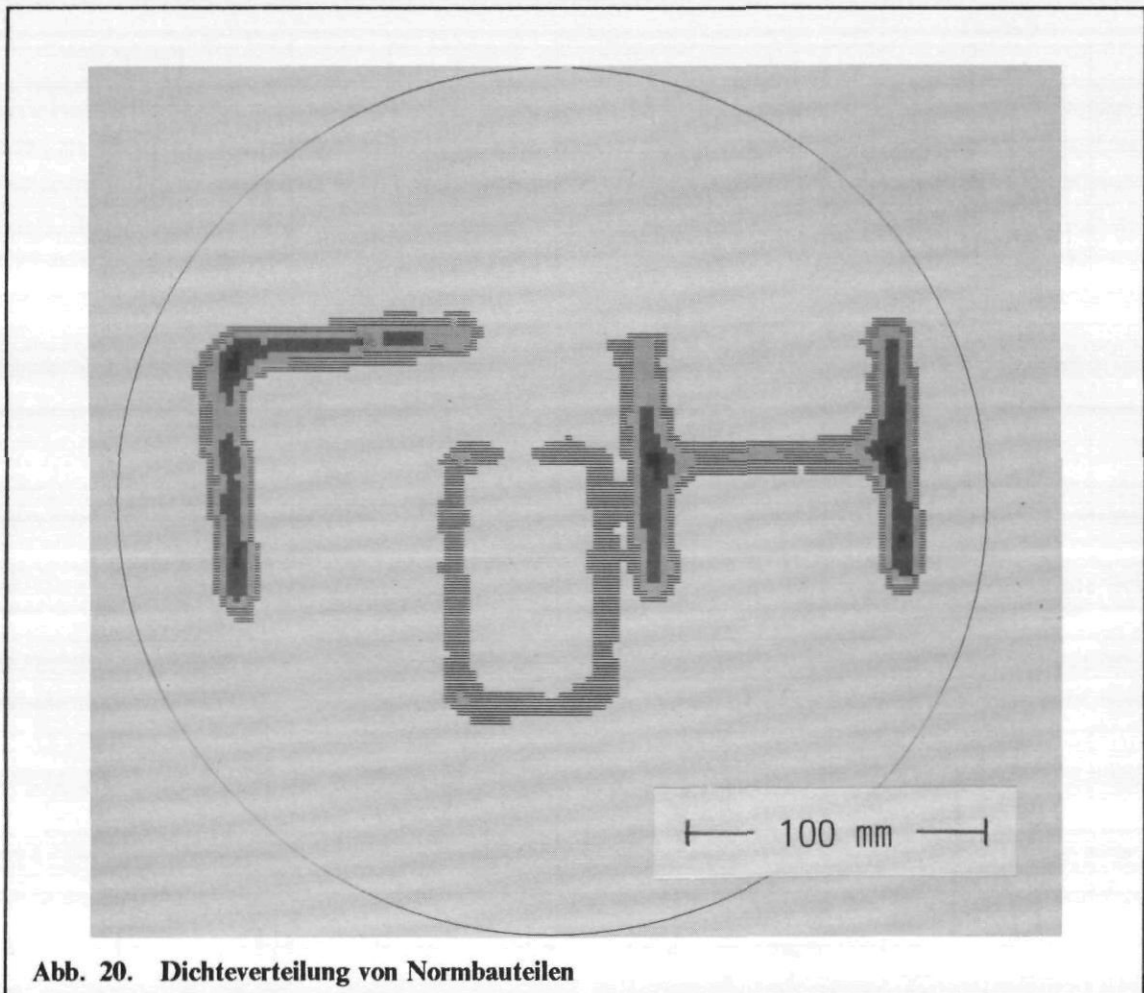
Die weitere Überprüfung des Verfahrens erfolgte mit realistischen Meßobjekten, deren Aktivitäts- bzw. Dichteverteilung bekannt waren, sowie an zementierten Abfallfässern mit unbekanntem Inhalt.

Überprüfung der TCT

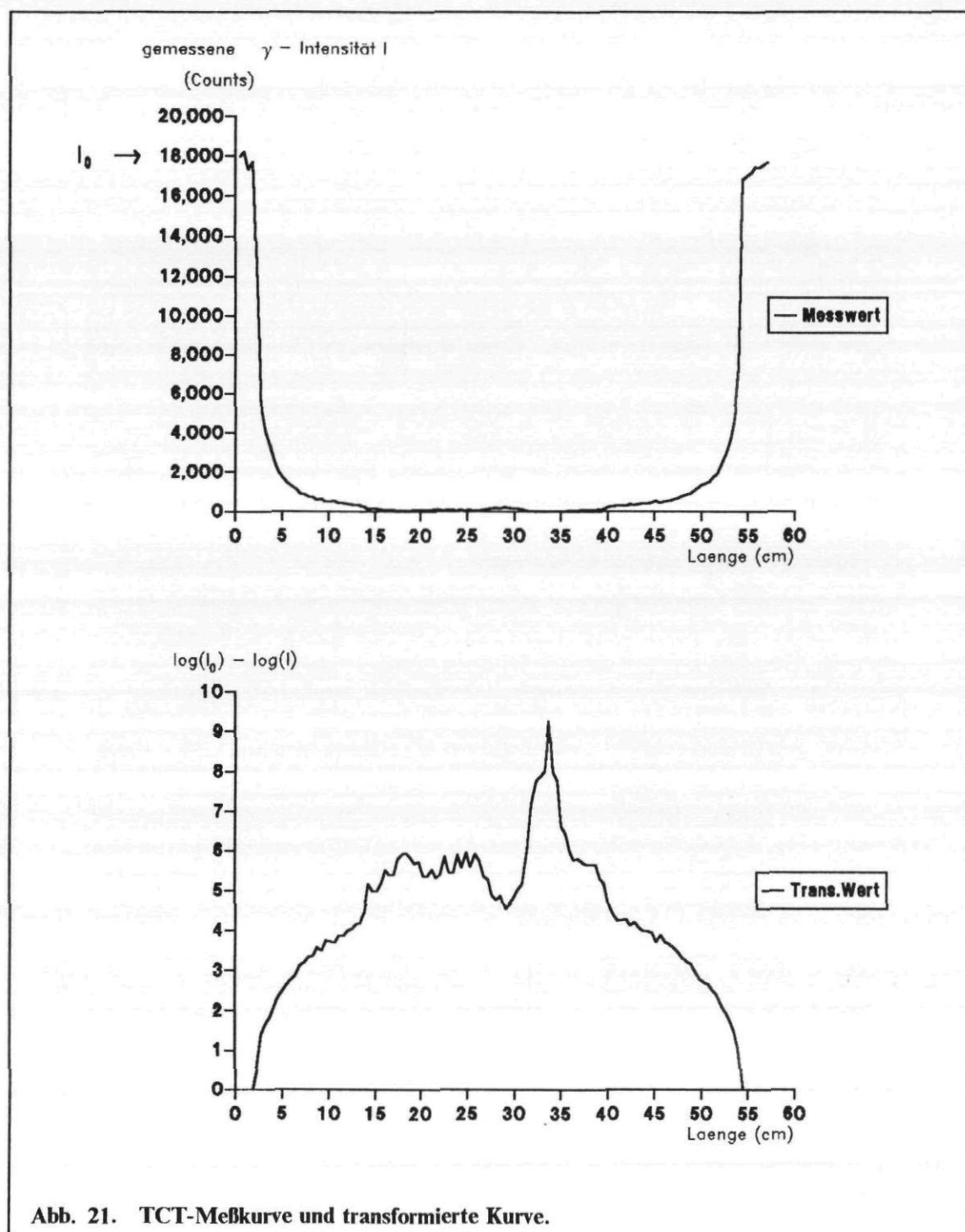
Um die Bildqualität einer mit TCT ermittelten Dichteverteilung zu prüfen, wurden einige Normbauteile aus Stahl auf den Drehteller gestellt und mit den gleichen Parametern ausgemessen wie ein Abfallfaß. Die Öffnung des Kollimators betrug 1 cm und es wurden 16 Winkelpositionen gemessen, deren transformierte Projektionen in Abb. 19 dargestellt sind.



Aus diesen 16 Projektionen wurde die Dichteverteilung in Abb. 20 rekonstruiert. Da die Objekte mit einer Meßstrahlbreite von 10 mm durchstrahlt wurden, konnten Profil- bzw. Wandstärken von weniger als 10 mm nicht den vollen Absorptionswert ergeben. Dieses wird besonders deutlich bei der Rekonstruktion eines Rechteckrohres mit nur 3 mm Wandstärke. Das 100 mm L-Profil mit 10 mm Profilstärke stellt die untere Grenze für eine materialgetreue Ermittlung des Absorptionsverhaltens bzw. der Dichte dar.



Im Zusammenhang mit der Überprüfung von Abfallfässern, bei denen Deklarationsunstimmigkeiten vermutet wurden, konnte die Durchstrahlungstomographie an realistischem Material angewandt werden. Dabei war das Ziel, die Fässer zerstörungsfrei zu untersuchen und eine Bohrkernentnahme aufgrund der vorliegenden Ergebnisse optimal zu plazieren. Die Durchstrahlung der Fässer erfolgte mit einer 100 Ci - Co 60 Quelle, wobei das Kollimatorsystem auf 1 cm Ortsauflösung ausgelegt war. Abb. 21 auf Seite 27 zeigt den typischen Verlauf einer Schwächungskurve und die nach Logarithmieren und Invertieren entstehende transformierte Kurve.



Es wurden jeweils 16 Winkelpositionen eingestellt ($16 \times 11,25^\circ$), was einer Gesamtdrehung des Fasses um 180° entspricht. Weil die Meßwerte der zweiten Halbdrehung denen der ersten entsprechen, ist bei der TCT nur eine Halbdrehung notwendig. Pro Winkleinstellung wurden 15 Minuten benötigt, um einen Verteilungsverlauf mit 100 Meßwerten zu erstellen, d.h. ca. 9 Sekunden pro Meßpunkt. Abb. 22 auf Seite 28 zeigt das rekonstruierte Bild mit der Verteilung der unterschiedlichen Schwächungskoeffizienten, die sich entsprechenden Dichten zuordnen lassen. Es zeigt sich, daß in das zementierte

Faß ein dickwandiger Innenbehälter eingesetzt wurde, dessen Inhalt wesentlich geringere Dichte als Beton aufweist. Die Wand des Innenbehälters hat einen für Eisen typischen Absorptionskoeffizienten, für den Behälterinhalt wurde eine Dichte von $1 - 1,2 \text{ g/cm}^3$ ermittelt.

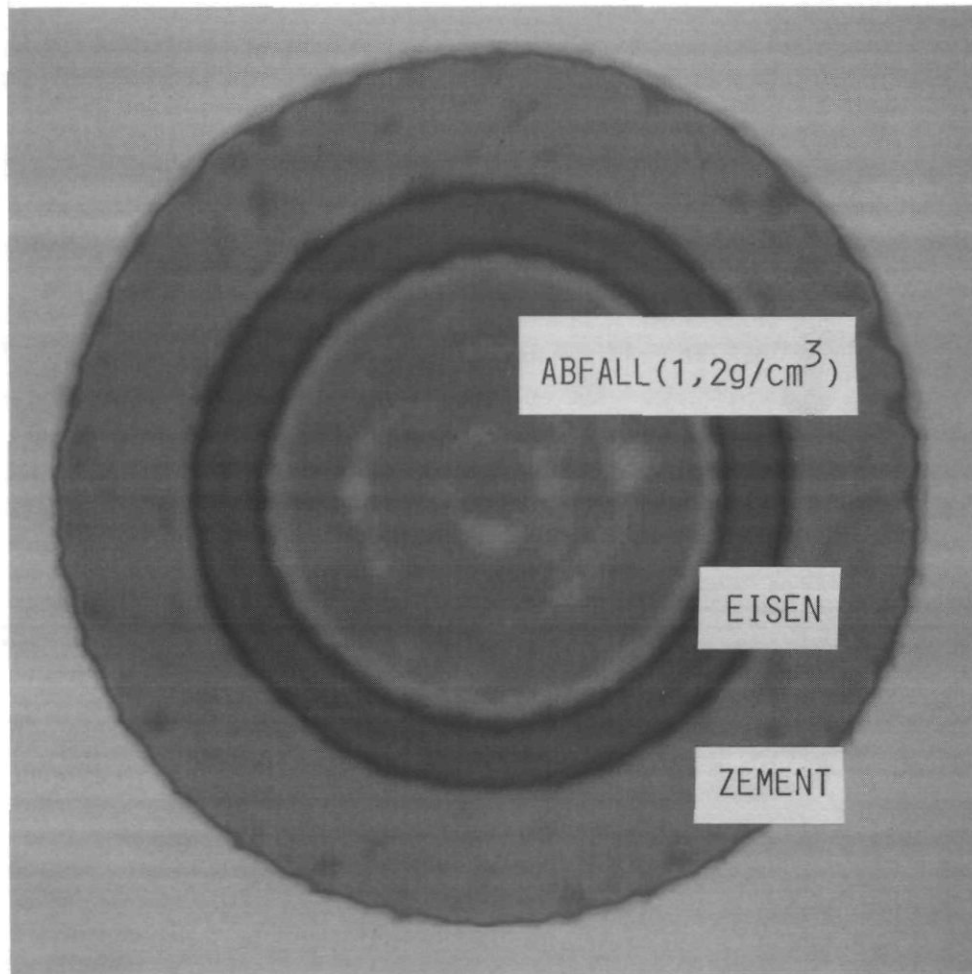


Abb. 22. Dichterekonstruktion eines Abfallfasses

Ein vergleichbares Faß wurde nach der Bohrkernentnahme gemessen (Abb. 23 auf Seite 29), wobei jetzt deutlich die beiden Bohrkanäle von etwa 40 mm Durchmesser im Schnittbild zu erkennen sind. Diese Messungen zeigen, daß in Zement mit eingegossene Teile hoher Dichte (Stahl, Blei) bzw. Hohlräume oder Massen mit geringerer Dichte als Beton (z.B. Asche, Flüssigkeiten, Kunststoffe usw.) zerstörungsfrei detektiert werden können.

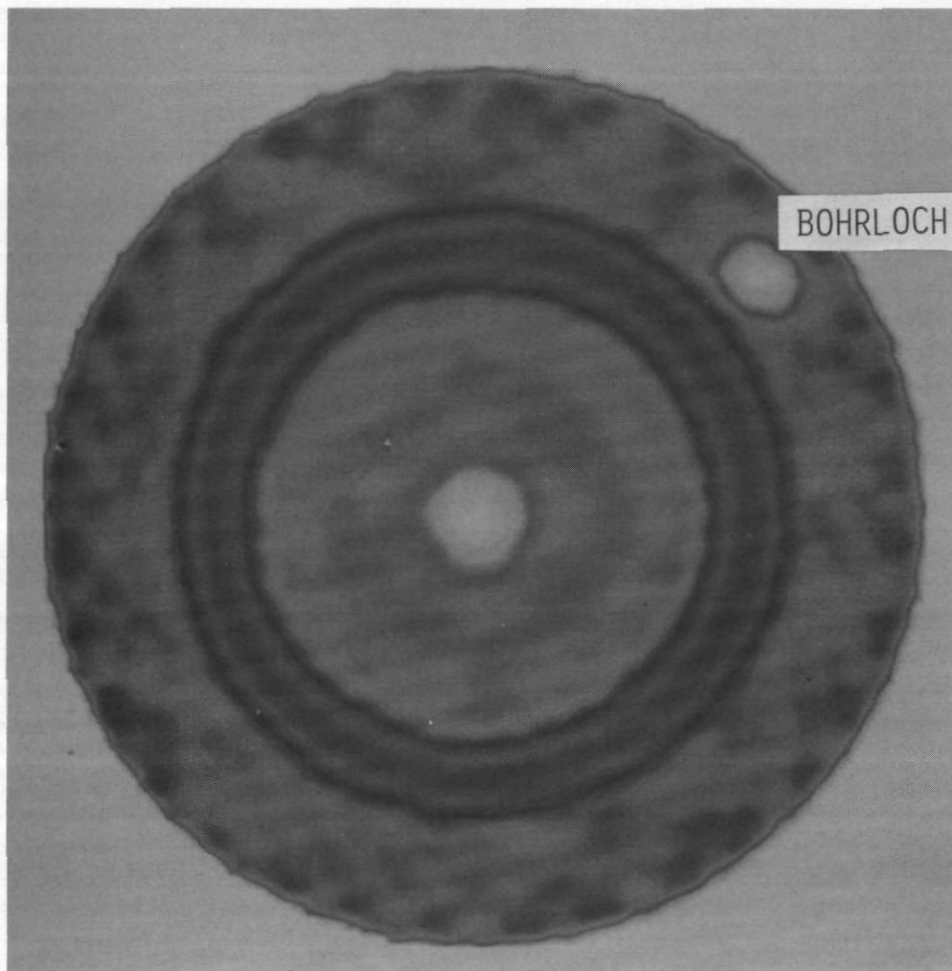


Abb. 23. Dichterekonstruktion eines Abfallfasses nach Bohrkernentnahme

Die Messungen dieses Fasses wurden benutzt, um eine Parameterstudie zur Reduktion der notwendigen Meßpositionen durchzuführen, weil damit sehr viel Meßzeit gespart werden kann.

Die Ergebnisse dieser Studie sind in Abb. 24 auf Seite 30 dargestellt. Es zeigte sich, daß bei der Rekonstruktion der Bilder mit unterschiedlichen Drehwinkeln, angefangen bei $2 \times 90^\circ$ über $4 \times 45^\circ$ und $8 \times 22,5^\circ$ erst die Messung von $16 \times 11,25^\circ$ eine ausreichende Bildqualität ergab, so daß die wesentlichen Konturen im Bild deutlich abgebildet wurden.

Aufgrund von zu wenigen Meßpositionen werden runde Konturen zwangsläufig als Polygone abgebildet, zusätzlich bilden sich Artefakte, d.h. in Wirklichkeit nicht vorhandene Dichteunterschiede.

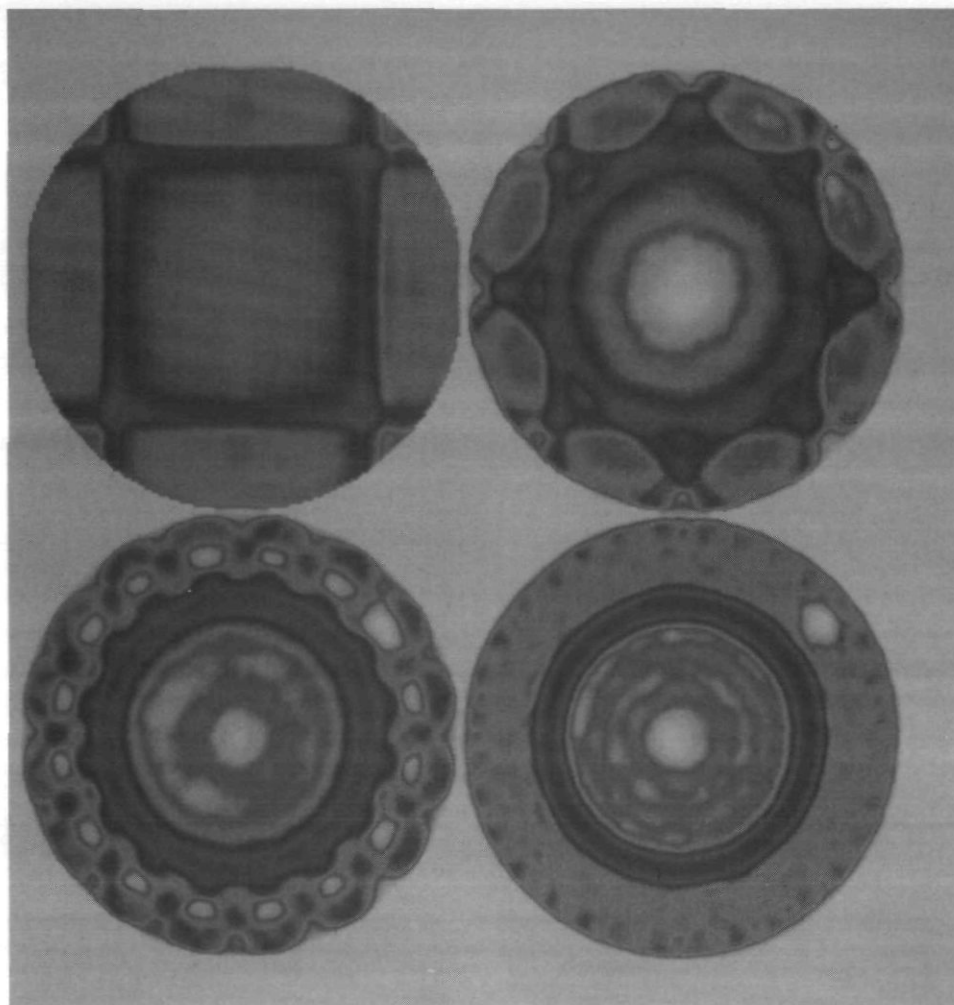


Abb. 24. Parameterstudie zur Anzahl nötiger Projektionen (2,4,8,16)

Die folgende Abbildung zeigt die Dichterekonstruktion des Abfallfasses in zwei weiteren Darstellungsarten, Höhenliniendarstellung und längs der Schnitlinie aufgeschnittenes 3D-Gebirge.

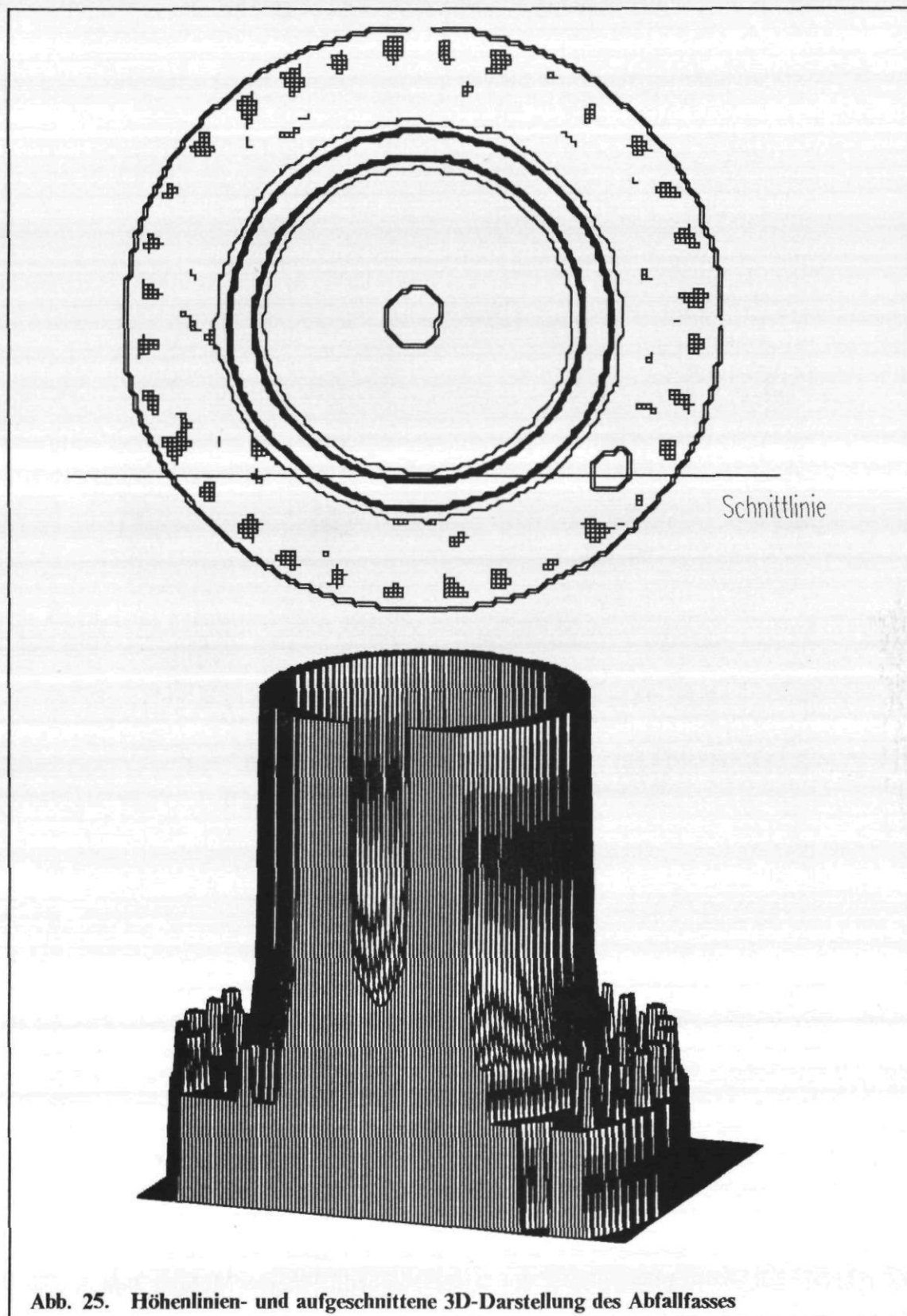


Abb. 25. Höhenlinien- und aufgeschnittene 3D-Darstellung des Abfallfasses

Ein Beispiel für die Dichteverteilung in einem 400 ℓ-Faß zeigt Abb. 26.

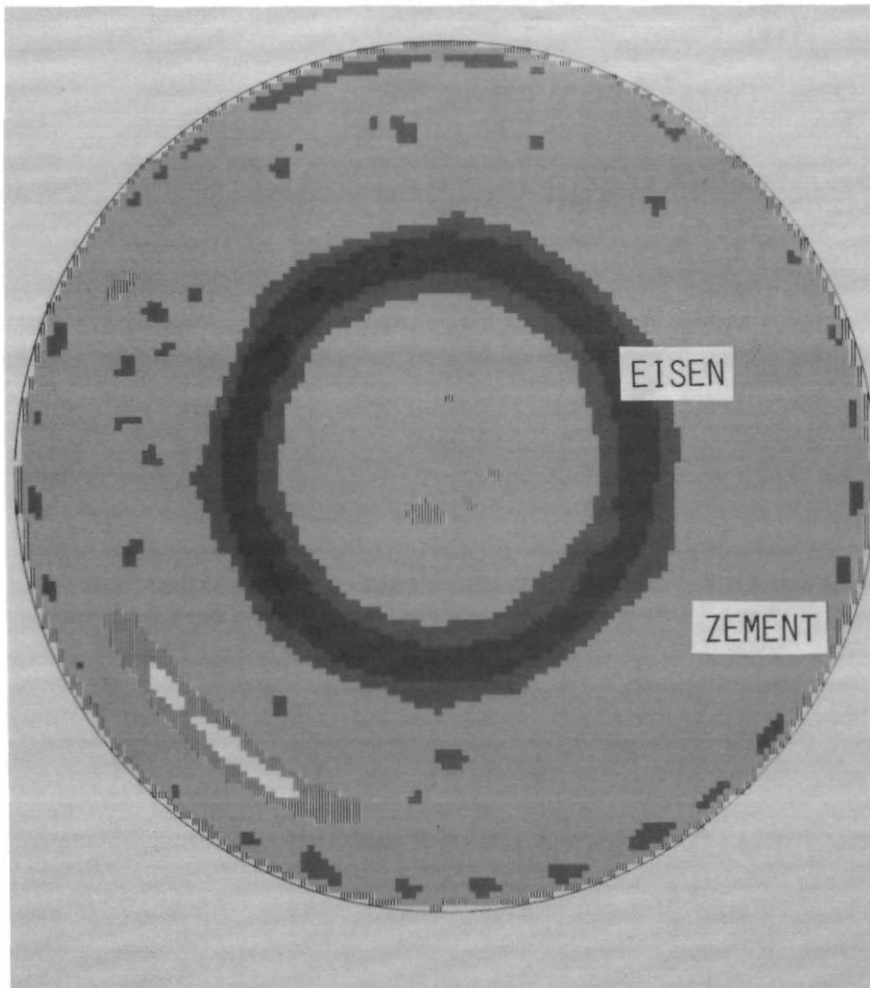


Abb. 26. Dichterekonstruktion eines 400 ℓ-Fasses

Ein 400 ℓ-Faß hat einen Durchmesser von 70 cm; dies bedeutet, daß γ -Strahlung mit einer Energie über 1 MeV im Vergleich zu einem 200 ℓ-Faß mit einem Durchmesser von 57 cm um den Faktor 5 mehr geschwächt wird, falls das Faß mit Beton gefüllt ist. Der Absorptionskoeffizient für Beton ist $\mu = 0,125$ pro cm, sodaß sich für eine 70 cm bzw. 57 cm dicke Schicht der Schwächungsfaktor $e^{-70 \times 0,125} = 0,000158$ bzw. $e^{-57 \times 0,125} = 0,000805$ ergibt.

Die relativ hohe Absorption mußte durch entsprechend längere Meßzeit kompensiert werden, da keine stärkere Strahlenquelle (100 Ci Co 60) zur Verfügung stand. Im vorliegenden Fall wurde für je eine Winkelposition eine Meßzeit von 30 Minuten benötigt.

Die Dichteverteilung läßt erkennen, daß ein dickwandiger Innenbehälter einzementiert wurde; die Zementierung ist nicht vollständig, erkennbar an einem ausgeprägten Hohlraum.

Ein weiteres Beispiel für einen Dichtequerschnitt mit sehr inhomogener Verteilung zeigt Abb. 27.

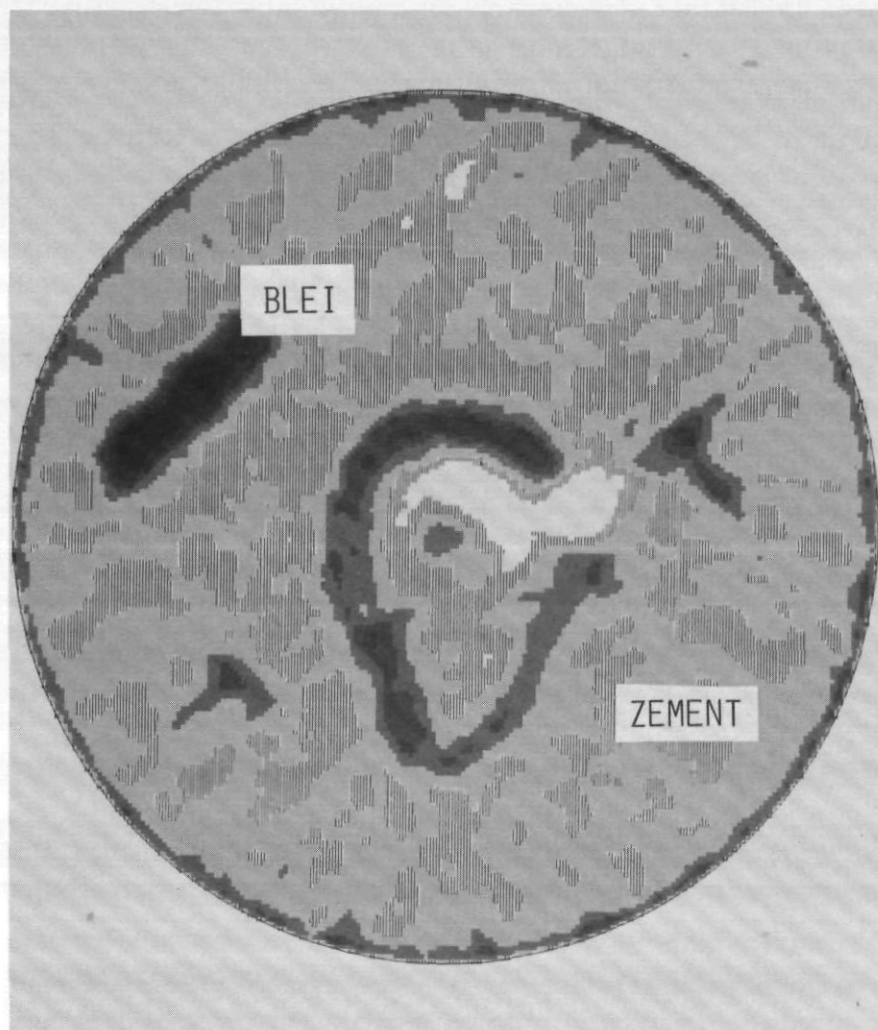


Abb. 27. Dichterekonstruktion eines 200 l-Fasses (stark inhomogen)

Es handelt sich um ein 200 l-Faß, in das eine U-förmig gebogene Abschirmung zusätzlich zu einem Bleiklotz und Stahlbauteilen eingebracht wurde. Ein nicht zementierter Hohlraum befindet sich im Zentrum des Fasses.

Überprüfung der ECT

1. Kugeltablett

Um eine Aktivitätsverteilung in einer Faßebene zu erzeugen, wurden Kugelbrennelemente aus dem AVR-Reaktor und nicht aktive Graphitkugeln benutzt. Die Kugelbrennelemente haben einen Durchmesser von 6 cm und besitzen eine brennstoffhaltige Innenzone von 5 cm, die aufgrund der Bestrahlung im Reaktor stark radioaktiv ist. Das Matrixmaterial der Brennelemente besteht aus Graphit. Auf einem Tablett aus Aluminiumblech werden nun verschiedene Muster aus strahlenden und nicht strahlenden Kugeln gelegt und die Zwischenräume mit Graphitgranulat verfüllt, um ein konstantes Absorptionsverhalten über den gesamten Querschnitt zu gewährleisten. Da Graphit ein ähnliches Absorptionsverhalten für γ -Strahlen aufweist wie Beton, kann diese Anordnung als repräsentativ für einzementierte Aktivität angesehen werden. Wesentliche Dichteunterschiede gab es nicht, so daß die Auswertung mit konstantem μ erfolgte. Der Durchmesser des Tabletts entspricht einem Faßdurchmesser (58 cm), die wesentliche γ -Photolinie war die des Cs 137 mit einer Energie von 662 keV. Das Muster aus Graphit- und Brennelementkugeln sowie die rekonstruierte Aktivitätsverteilung zeigt folgende Abb. 28 auf Seite 35.

Abb. 13 auf Seite 20 zeigt den typischen Verlauf eines von 32 gemessenen γ -Aktivitätsverläufen und die nach 4 Iterationen erzielte Anpassung, die sich aus dem rekonstruierten Bild errechnet. Deutlich erkennbar wird, daß die einzelnen Brennelemente mit verschiedenen Intensitäten strahlen, was bei späterer Einzelvermessung der Brennelemente bestätigt werden konnte. Die teilweise sichtbare Unrundheit ist auf Positionierungstoleranzen zurückzuführen.

Die nächste Abbildung (Abb. 29 auf Seite 36) zeigt ein weiteres Muster sowie die rekonstruierte Verteilung.

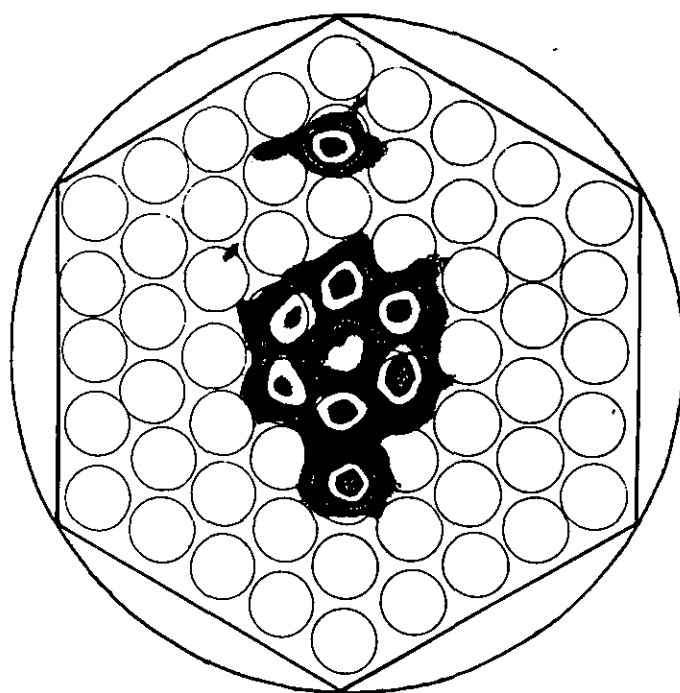
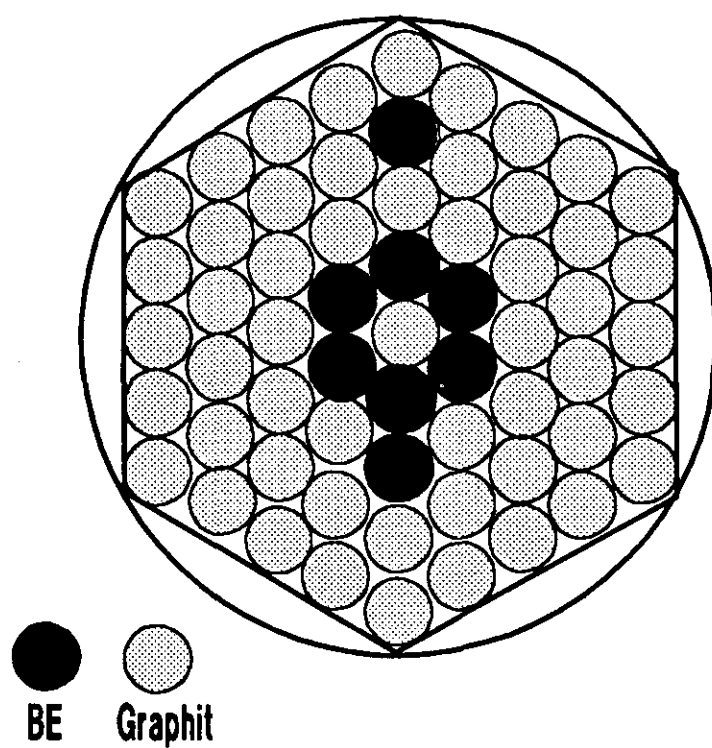


Abb. 28. Muster aus Graphit- und Brennelementkugeln und rekonstruierte Aktivitätsverteilung

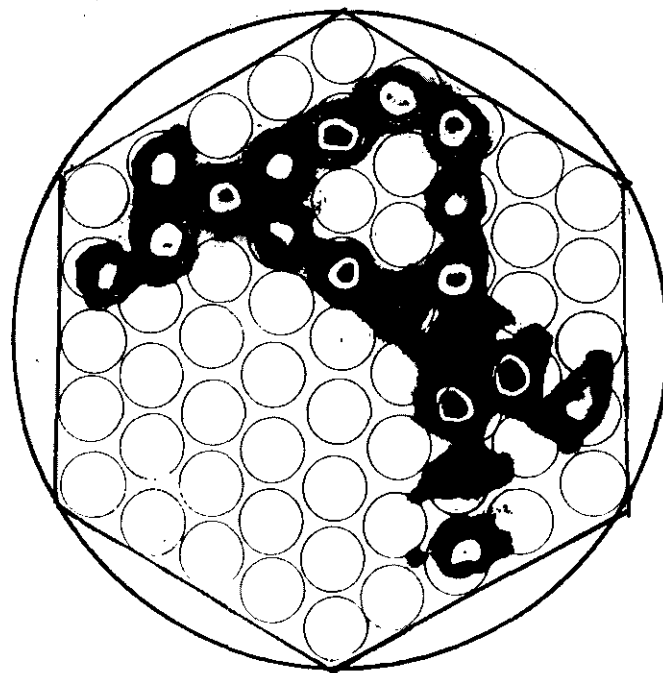
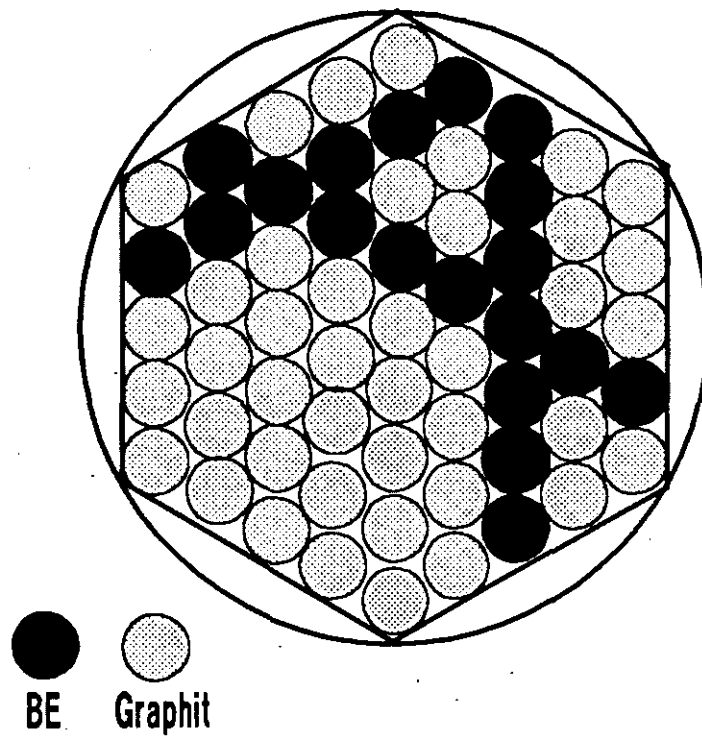


Abb. 29. Muster aus Graphit- und Brennelementkugeln und rekonstruierte Verteilung

2. MAW-Faß mit einzementierten LWR-Brennelementstrukturteilen

Im Rahmen eines Meßprogramms zur Radiolysegasentwicklung befindet sich ein MAW-Faß⁵ mit einzementierten LWR-Brennelement-Strukturteilen⁶ in den Heißen Zellen. In das Faß wurden abgesägte Abstandshalter (Kopf- und Fußstück) sowie Absorberführungsrohre eines LWR-Brennelementbündels aus der Wiederaufbereitungsanlage Karlsruhe eingelagert. Vor dem Zementieren wurde ein Photo aufgenommen (Abb. 30), welches die Anordnung der Schrotteile im Faß wiedergibt.

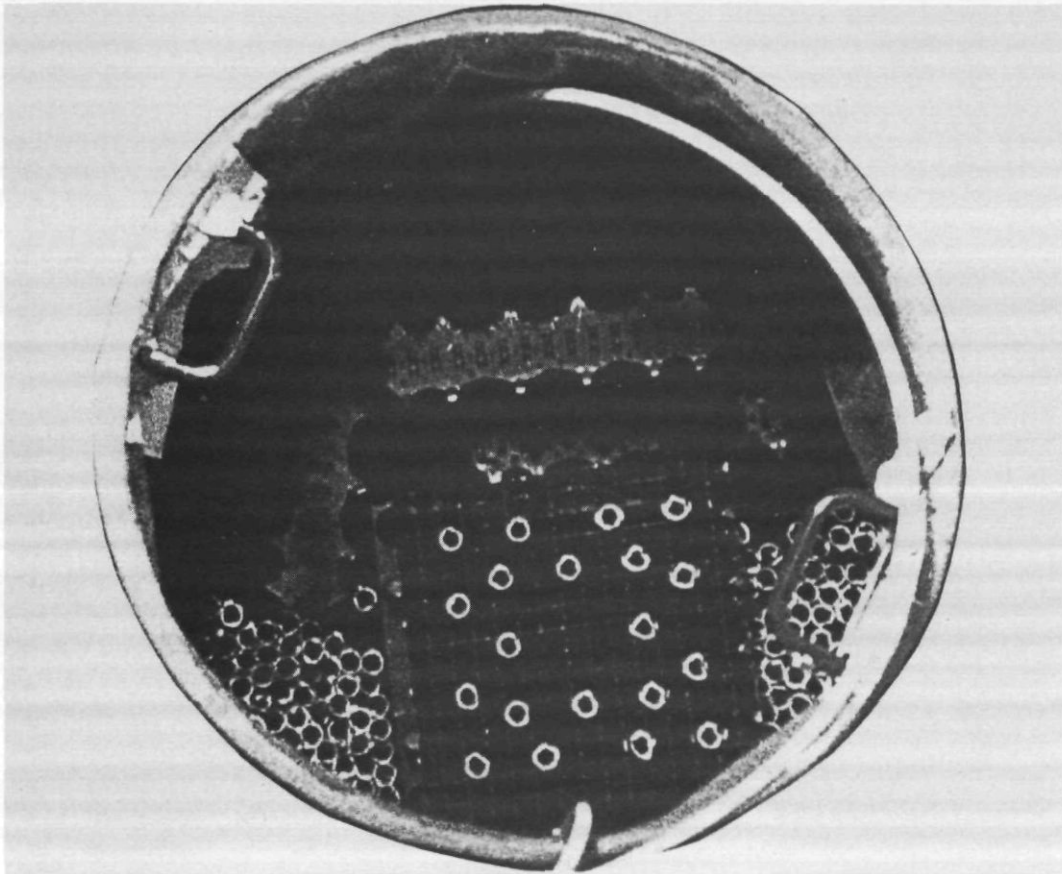


Abb. 30. Fotografie eines MAW-Fasses bei Beladung

Abb. 31 auf Seite 38 zeigt das rekonstruierte Bild der ECT-Untersuchung, wobei die Rechnung mit einem konstanten Schwächungskoeffizienten für Beton durchgeführt wurde. Das tomographische Bild zeigt die Rohrbündel, die aufgrund der Standzeit im höheren Neutronenfluß stärker strahlen als die Kopf- und Fußstücke. Gemessen wurden die Photolinien des Co 60 oberhalb einer Energie von 1 MeV. Da die Kollimatoröffnung 1 cm betrug, konnten einzelne Rohre nicht separat erfaßt wer-

⁵ MAW Medium Active Waste

⁶ LWR Leichtwasserreaktor

den. Hinzu kommt, daß für die Rekonstruktion des Bildes nur acht Verteilungsmessungen zur Verfügung standen (jeweils $8 \times 45^\circ$ gedreht), was bei der ECT als Minimum von Winkelpositionen anzusehen ist, um ein Bild rekonstruieren zu können.

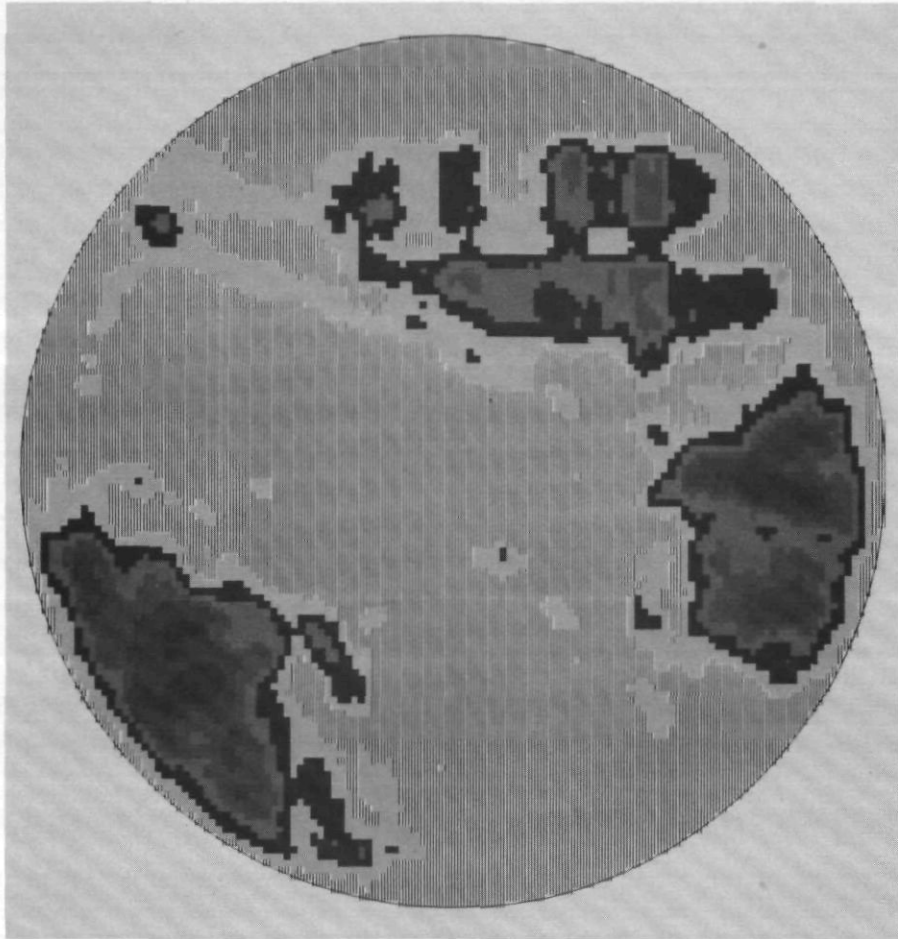


Abb. 31. γ -Aktivität des MAW-Fasses

3. Zementiertes Abfallfaß mit dickwandigem Innenbehälter

Nachdem an zementierten Abfallfässern aufgrund der Dichtemessung festgestellt worden war, daß diese einen dickwandigen Innenbehälter mit Abfallstoff enthalten (siehe Abb. 23 auf Seite 29), wurde eine Emissions-Computer-Tomographie durchgeführt. Da die Oberflächendosisleistung unter 100 m rem/h betrug, brauchten diese Fässer nicht in die Heiße Zelle eingeschleust zu werden. Der Meßplatz bestand dabei aus einem Drehteller, auf dem das Faß stand, und einer Verschiebevorrichtung für den Detektor samt Abschirmung.

In der Abschirmung befand sich ein Kollimator mit einem Schlitz von 1 cm Breite und 5 cm Höhe. Der Abstand zwischen Detektor und Faß betrug 25 cm. Einen typischen Verlauf der Aktivität von Co 60 zeigt Abb. 32 auf Seite 39.

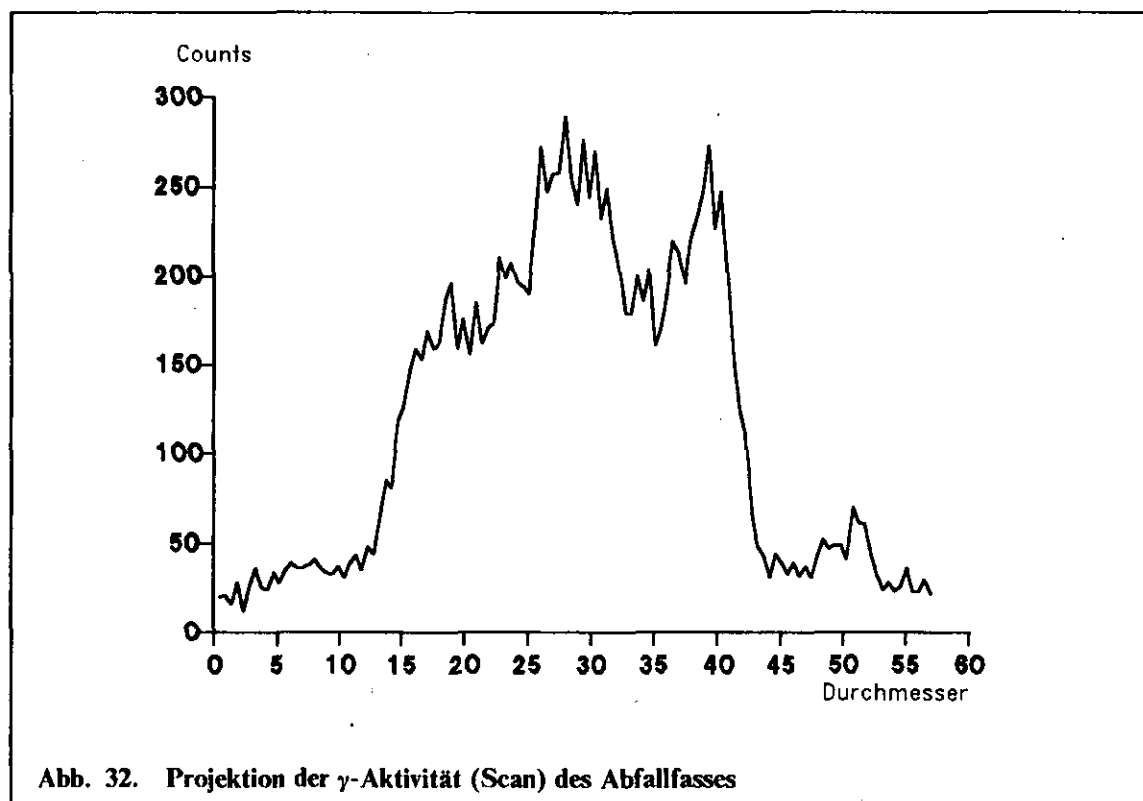


Abb. 32. Projektion der γ -Aktivität (Scan) des Abfallfasses

Deutlich zu erkennen ist, daß sich die Aktivität inhomogen verteilt im Innenbehälter befindet. Die Rekonstruktion aus 16 Meßverläufen zeigt die Verteilung in der Schnittebene, insbesondere wird die sehr inhomogene Beladung deutlich (Abb. 33 auf Seite 40).

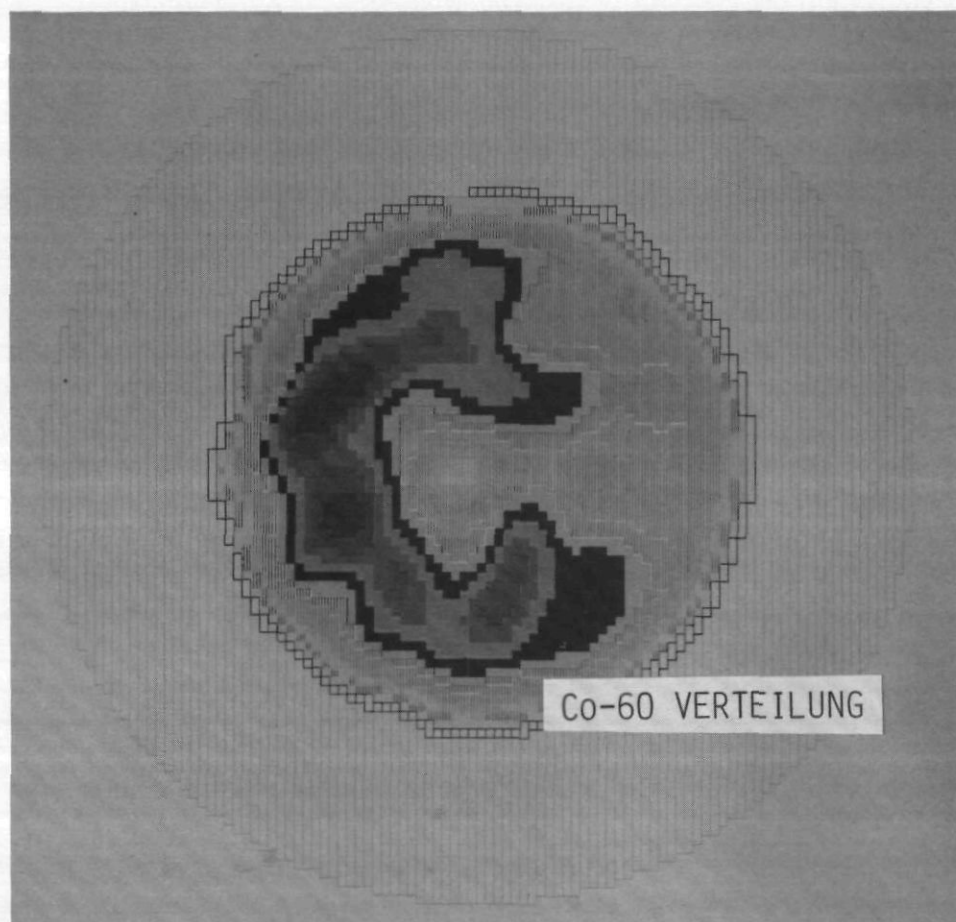


Abb. 33. γ -Aktivität des Abfallfasses

Apparative Weiterentwicklung der Tomographie

Die bisher an Fässern und Testobjekten durchgeführten Messungen wurden mit einer Versuchseinrichtung durchgeführt, die der Systementwicklung diente und nicht für die praktische Anwendung optimiert wurde.

Dieses bezieht sich insbesondere auf die Verwendung einer nicht abgeschirmten γ -Quelle, die zur Durchstrahlung der Fässer benutzt wurde und aufgrund der hohen Strahlung nur in einer Heißen Zelle gehandhabt werden darf. Hinzu kam, daß bei Installation der Versuchseinrichtung mit stark strahlenden Fässern gerechnet wurde, die ebenfalls nur in einer abgeschirmten Zelle untersucht werden können.

Die Mehrzahl der zu untersuchenden Fässer hat jedoch eine Oberflächendosisleistung von weniger als 200 m rem/h, so daß das zeitaufwendige Einschleusen und fernbediente Handhaben in einer Zelle nicht notwendig sind.

Aus diesem Grunde wurde eine Anlage geplant, die in einem leichter zugänglichen Kontrollbereich außerhalb der abgeschirmten Zelle arbeiten kann.

Abb. 34 zeigt den grundsätzlichen Aufbau.

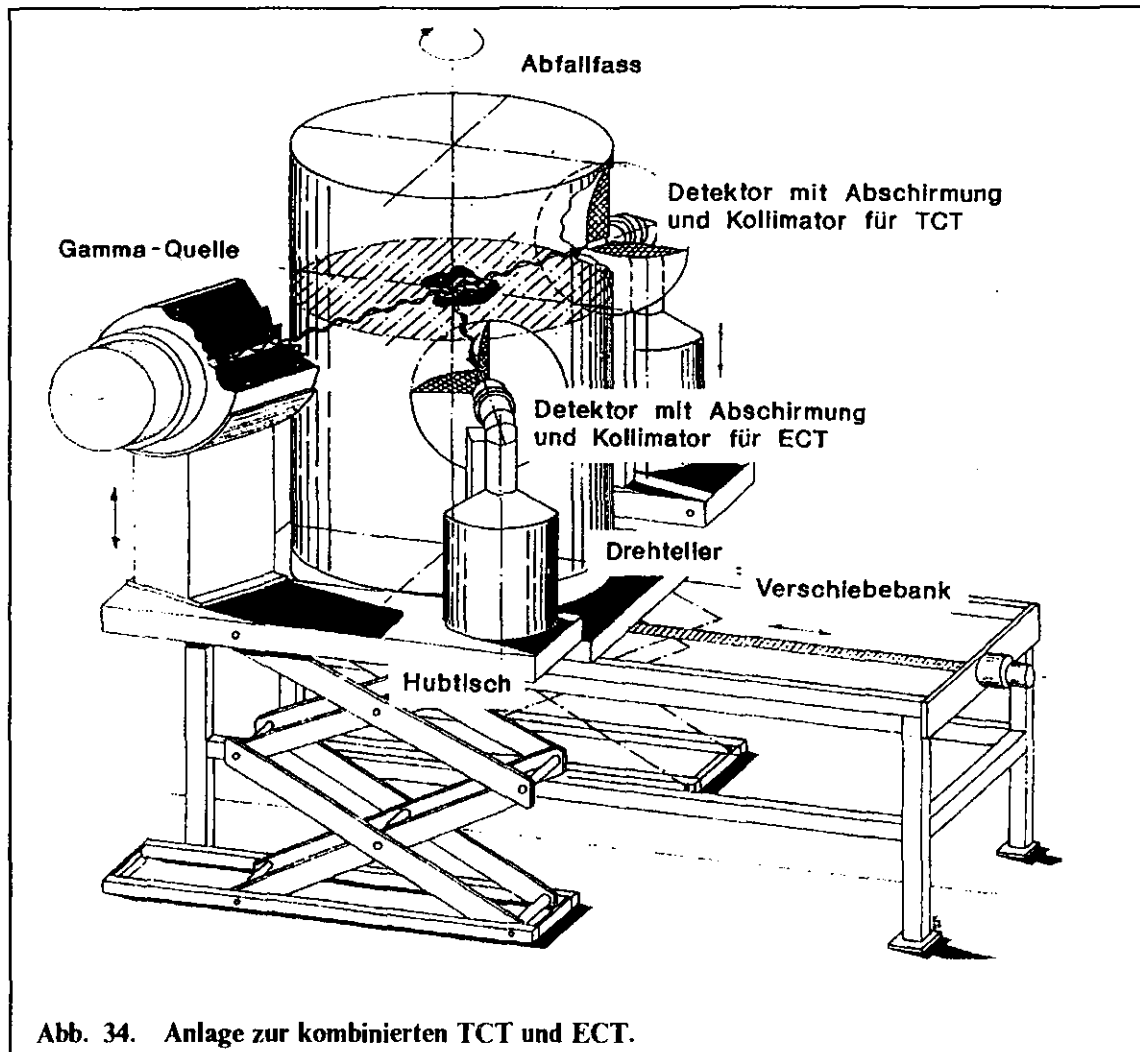


Abb. 34. Anlage zur kombinierten TCT und ECT.

Das Faß steht während der Messung auf einem Drehteller, der auf einer Verschiebebank montiert ist.

Die Transmission-CT wird mit einer abgeschirmten Co 60-Quelle (100 Ci) durchgeführt, die für Durchstrahlungsprüfungen Verwendung findet. Als Detektor wird ein großvolumiger Ge-Detektor mit Kollimatorsystem eingesetzt, der gegenüber der Umgebungsstrahlung abgeschirmt ist. Da die Eigenstrahlung des Fasses in vielen Fällen ebenfalls Co 60 enthält, führt dies zu Überlagerungen, die bei der Auswertung berücksichtigt werden müssen. Aus diesem Grunde ist neben der abgeschirmten γ -Quelle ein zweiter baugleicher abgeschirmter Detektor angeordnet, der die Eigenstrahlung des Fasses mißt. Mit diesen Meßwerten wird zum einen eine Korrektur der TCT-Meßwerte durchgeführt, zum anderen wird die Verteilung der Eigenstrahlung in der betreffenden Faßebeine durch ECT berechnet.

γ -Quelle und Detektoren sind auf zwei Hubtischen montiert, um verschiedene Faßebenen anfahren zu können. Eine 3D-Darstellung der Dichte- bzw. Aktivitätsverteilung wird somit möglich.

Der Meßzeitbedarf für die Bearbeitung einer Faßebeine soll im Bereich von 1.5 Stunden liegen, so daß im Bedarfsfall eine 3-dimensionale Darstellung im Bereich eines Tages möglich ist. Dieses wird allerdings in den wenigsten Fällen notwendig sein, da die wesentlichen Fragen, z.B. nach Art und Geometrie eines einzementierten Innenbehälters, mit dem Ausmessen einer Faßebeine und einem einzigen Dichte-Scan in axialer Richtung, wobei γ -Quelle und Detektor an der Faßwand heraufgefahren werden, beantwortet werden können. Die Maschinensteuerung, die Meßfolge sowie die Vorauswertung der Meßdaten werden mit Hilfe eines PC durchgeführt. Die Berechnung der Verteilungsbilder erfolgt entweder auf dem Großrechner im ZAM oder in einer weiteren Entwicklungsstufe in einer entsprechend angepaßten Form ebenfalls auf einem PC.

Literatur

1. Müllauer, J. Behrens, M. : Messung der radialen Spaltproduktverteilung an LWR-Bremsstäben mittels der γ -Computer-Tomographie
Arbeitstagung Heiße Laboratorien und Fernbedienung, Cadarache 1985
2. Reimers, P. Göbbels, J. : New Possibilities of Nondestructive Evaluation by X-Ray Computed Tomography
Mat.Eval. 41 (1983), p.732-737
3. Radon, J. : Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten
Berichte Sächsische Akademie der Wissenschaften, Leipzig, 1917, Math.-Phys. Kl.69, S.262-267
4. Lewitt, R.M. : Reconstruction Algorithms, Transform Methods
Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No.3, March 1983, p.390-408
5. Herman, G.T.(Ed.) : Image Reconstruction From Projections, Implementation and Applications
Topics in Applied Physics Vol.32., 1979, Springer Verlag

6. Kaczmarz,S. : Angenäherte Auflösung linearer Gleichungssysteme
Bull.Int.Acad.Pol.Sci.Lett. A, 1937, S.355-357
7. Tanabe,K. : Projection Method for Solving a Singular System of Linear Equations
and Its Application
Numer.Math. 17, 1971, p.203-214
8. Censor,Y. : Finite Series-Expansion Reconstruction Methods
Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No.3, March 1983, p.409-419
9. Herman,G.T. : Image Reconstruction from Projections, The Fundamentals of
Computerized Tomography
Academic Press 1980
10. Gordon,R. Bender,R. Herman,G.T. : Algebraic Reconstruction Techniques (ART)
for Three-dimensional Electron Microscopy and X-ray Photography
J.theor.Biol. (1970) 29, p.471-481